



TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Puunjalostustekniikan osasto

Teemu Liukkonen

**FORMAATION OPTIMOINTI GRAAFISEN KARTONGIN
PINTAOMINAISUUKSIEN PARANTAMISEKSI**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 26.4.2002.

Valvoja

Professori Jaakko E. Laine

Ohjaaja

Diplomi-insinööri Ari Huovila

Tekijä Teemu Liukkonen	Päiväys 26.04.2002 Sivumäärä 117
Työn nimi Formaation optimointi graafisen kartongin pintaominaisuuksien parantamiseksi	
Professuuri Paperitekniikka	Koodi Puu-21
Työn valvoja Professori Jaakko E. Laine	
Työn ohjaaja Diplomi-insinööri Ari Huovila	
<p>Tämän työn tavoitteena oli parantaa kartonkikone 2:lla tuotetun graafisen kartongin formaatiota. Samalla pyrittiin kartoittamaan pohjakartongin formaation vaikutusta päällystetyn kartongin pintaominaisuuksiin. Kirjallisuuden avulla tarkasteltiin graafista kartonkia tuotteena, formaation käsitettä ja mittausmenetelmiä, rainanmuodostuksen teoriaa, tasoviiran rainanmuodostusprosessia sekä formaation vaikutusta kartongin pintaominaisuuksiin ja painettavuuteen.</p> <p>Formaatiota parannettiin tässä työssä optimoimalla perälaatikon hallintasuureita, lyhentämällä kartongin runkokerroksen keskimääräistä kuidunpituutta ja muuttamalla kartongin kerospainosuhteita. Perälaatikon hallintasuureista tarkasteltiin huuliauukkoa, huulieroja ja huulisuihkun suihku/viira -nopeussuhdetta. Runkokerroksen keskimääräistä kuidunpituutta lyhennettiin korvaamalla runkokerroksen valkaistu mäntyselä valkaistulla koivuselällä. Kerospainosuhteen muutoksen tavoitteena oli kasvattaa pinta- ja taustakerroksen perälaatikoiden virtausmäärää lähemmäs optimivirtaamaa.</p> <p>Formaation parantaminen ja sen vaikutusten kartoittaminen toteutettiin neljän tehdasmittakaavaisen kartonkikonekoeajon avulla. Näistä kolme ensimmäistä toteutettiin 3^m-faktoriokokeina ja neljäs, päällystämätön koeajo, kolmen koepisteen sarjana. Lisäksi kilpailijavertailun avulla tarkasteltiin formaation vaikutusta graafisten kartonkien pintaominaisuuksiin ja painettavuuteen. Koepisteistä otetuista näytteistä suoritettiin mittauksia tavanomaisten standardimenetelmien mukaisesti. Formaatio mitattiin Ambertecin Beta Formation Tester -laitteella. Lisäksi pintaominaisuuksien määrittämiseen käytettiin polttopeittävyys-, prescale-, Bristow- ja profilometrimenetelmiä. Kahdesta koeajosta otettuja näytteitä myös painettiin arkkioffsetmenetelmällä ja painatustulosta arvioitiin sekä visuaalisesti että kuva-analyysin avulla (mottling). Tuloksia tarkasteltiin regressioanalyysin keinoin ja tulosten luotettavuutta arvioitiin 95 % luottamusvälin avulla.</p> <p>Perälaatikoiden hallintasuureiden optimointikoeajossa runkokerroksen suihku/viira-nopeussuhde ja huuliauukko sekä taustakerroksen suihku/viira-nopeussuhde olivat merkittäviä formaatioon vaikuttavia tekijöitä. Huuliero ei vaikuttanut merkittävästi formaatioon. Runkokerroksessa paras formaatio saavutettiin suurella ja taustakerroksessa pienellä suihku/viira-nopeussuhteella. Kaikissa kerroksissa paras formaatio saavutettiin suurimmalla huuliauukolla. Runkokerroksen formaatio vaikutti merkittävästi kartongin pinnan ja taustan Bendtsen-sileyteen.</p> <p>Runkokerroksen formaatio parani merkittävästi koivuosuutta kasvattamalla (kevyemmällä lajilla 20 % ja raskaammalla lajilla 14 %) ja oli 100 % koivuosuudella parempi kuin pinta- ja taustakerroksen formaatio. Taustakerroksen perälaatikon virtausmäärän kasvun todettiin parantavan formaatiota hieman. Raskaammalla lajilla formaatio korreloi merkittävästi pinnan Bendtsen-sileyden ja prescale-määrittämisestä lasketun flokkikoon kanssa. Painojäljen visuaalisen arvioinnin tulokset jäivät osittain ristiriitaisiksi. Painojäljen laikuilu korreloi hyvin heikosti kartongin formaation kanssa.</p> <p>Päällystämättömässä koeajossa havaittiin formaation riippuvan lähes lineaarisesti perälaatikkosakeudesta. Pinta- ja taustakerroksen sileydet korreloivat voimakkaasti formaation kanssa. Saatujen tulosten perusteella pohjakartongin Bendtsen-sileyttä voidaan selvästi parantaa formaatiota parantamalla.</p> <p>Kilpailijavertailun tulokset osoittivat pienen värinabsorptiokyvyn omaavan ja sileän kartongin pinnan antavan hyvän painatustuloksen. Formaation suora vaikutus päällystetyn pinnan painatustulokseen havaittiin vähäiseksi.</p> <p>Pohjakartongin formaatiota pystyttiin tässä työssä parantamaan selvästi, mutta formaation vaikutus päällystetyn pinnan ominaisuuksiin jäi vähäiseksi. Työssä saadut tulokset vastasivat varsin hyvin kirjallisuudessa aiemmin esitettyjä tuloksia.</p>	
Avainsanat Formaatio, kartonki, SBS, monikerros, pintaominaisuudet, parantaminen, mittausmenetelmät, rainanmuodostus, flokkautuminen, kuidunpituus, tasoviirakone, perälaatikko, viiraosa, painettavuus, mottling	Kieli Suomi

Author Teemu Liukkonen	Date 26.04.2002 Pages 117
Title of Thesis The optimization of formation to improve surface properties of graphical board	
Chair Paper Technology	Chair Code Puu-21
Supervisor Professor Jaakko E. Laine	
Instructor Ari Huovila MSc (Tech)	
<p>The aim of this master's thesis was to improve the formation of graphical board produced on Board Machine 2. The secondary objective was to clarify the effect of base board formation improvement on surface properties of graphical board. The literature review deals with graphical board as a product, the concept of formation, measurement of formation, the theory of web forming, fourdrinier forming and the effects of formation on surface properties and printability.</p> <p>The formation was improved by optimizing the headbox control variables, by decreasing the average fiber length in the base ply and by changing the weight ratio between the surface and back plies and the base ply. The headbox control variables examined were slice opening, upper slice lip setback behind the lower slice lip and jet speed to wire speed ratio. The average fiber length was decreased by replacing bleached softwood kraft with bleached hardwood kraft. The rationale behind the weight ratio alteration was to increase the flow rates of surface and back ply headboxes to optimum flow rates.</p> <p>The improvement of formation and the clarification of effects were achieved by means of four industrial-scale board machine trial runs. Three out of the four trial runs were carried out as 3^m factorial experiments and the fourth, uncoated trial run, was carried out simply as a series of three trial points. A competitor study of graphical boards was also carried out to establish the relationship between formation, surface properties and printability. Measurements were made on the trial point samples according to standard methods. Formation was measured using Ambertec Beta Formation Tester. Additional surface properties were determined using burnout, prescale, Bristow and profilometry tests. A sheet-fed offset trial printing was also carried out. Printing results were analyzed using visual assessment and image analysis (mottling). The results were analyzed using regression analysis and the reliability of the results was assessed using 95 percent confidence interval.</p> <p>The aim of the first trial run was to optimize the control variables of the headboxes. Jet/wire-ratio and the slice opening of the base ply headbox and the jet/wire-ratio of the back ply headbox affected the formation significantly. Slice setback did not affect formation significantly. The best formation level was reached in base ply by using the largest and in the back ply by using the smallest jet/wire-ratio. The best formation level in all of the plies was reached by using the largest slice opening. The formation level of the base ply was shown to significantly affect the Bendtsen-roughness of the topside and back-side surfaces of the board.</p> <p>Base ply formation was significantly improved by increasing the amount of hardwood kraft pulp in the base ply (20 % at lower grammage and 14 % at higher grammage) and was shown to be better than the other plies at 100 % birch ratio. Increase in headbox flow rate was shown to improve the back ply formation slightly. For the higher grammage trial run Bendtsen-roughness of the surface ply and floc size were shown to correlate significantly with formation. The results of the paired comparison of sheet-fed offset print quality remained inconclusive. Mottling correlated only slightly with formation.</p> <p>In the uncoated trial run, formation was shown to be almost linearly dependent on the headbox consistency. Roughness of the topside and backside surfaces of the board correlated strongly with formation. According to the results obtained, it seems that the Bendtsen-roughness of the base board can be significantly improved by improving formation.</p> <p>The results of the competitor study indicate that a good print quality can be obtained through a smooth surface that has a low ink absorptivity. The effect of formation on the print quality of coated board surface was found to be weak.</p> <p>It was possible to improve the formation of the base board significantly, but the effects of formation on properties of coated surface were found to be modest. The results obtained mainly agree with the results proposed in the existing literature.</p>	
Keywords Formation, board, cartonboard, SBS, multi-ply, surface properties, improvement, measurement, web forming, flocculation, fiber length, fourdrinier, headbox, wire section, printability, mottling	Language Finnish

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Stora Enso Consumer Boards'in Imatran tehtailla. Työn valvojana on toiminut professori Jaakko E. Laine Teknillisen korkeakoulun Paperitekniikan laboratoriosta. Stora Enso Oyj:n puolesta työn ohjaajana on toiminut kartonkikone 2:n käyttöpäällikkö, diplomi-insinööri Ari Huovila. Myös Kaukopään tehtaan kehityspäällikkö Harri Kujala vaikutti monin tavoin työn edistymiseen. Parhaimmat kiitokseni lausun näille kolmelle saamastani tuesta ja ohjauksesta.

Tämän työn valmistumiseen ovat merkittävästi myötävaikuttaneet myös Stora Enson Imatran tutkimuskeskuksen vanhempi tutkija Isto Heiskanen sekä Kuitu- ja paperifysiikan laboratorion henkilökunta paperiteknikko Riitta Riikosen johdolla.

Lisäksi osoitan kiitokseni koko kartonkikone 2:n henkilöstölle; teknisen asiakaspalvelun väelle, insinööreille, päivämeistereille, käyttöhenkilökunnalle ja käytöntarkkailijoille sujuvasta ja hedelmällisestä yhteistyöstä.

Imatralla 26. huhtikuuta 2002



Teemu Liukkonen

SISÄLLYSLUETTELO

	Sivu
1 JOHDANTO	7
1.1 Työn tausta	7
1.2 Työn tavoitteet.....	7
1.3 Työn rajaukset.....	8
2 GRAAFISEN KARTONGIN TUOTEANALYYSI.....	10
2.1 Graafinen kartonki tuotteena	10
2.1.1 Graafiset kartonkilajit	10
2.1.2 Ensocoat-kartonki	10
2.1.3 Graafinen kartonki ja päällystetty hienopaperi.....	11
2.2 Graafisen SBS-kartongin tuoteanalyysi.....	12
2.3 Graafisen kolmikerrosvälikartongin edut.....	14
2.3.1 Monikerrosraustekäsitteiden käytön perusteet	14
2.3.2 Formaatio.....	14
2.3.3 Jäykkyys	15
2.3.4 Tuotannon tehokkuus	17
2.3.5 Raaka-ainekoostumuksen optimointi	18
3 FORMAATIO.....	19
3.1 Yleistä	19
3.2 Formaation määritelmä	21
3.3 Formaation tunnusluvut.....	22
3.3.1 Neliömassajakauman intensiteetti.....	22
3.3.2 Neliömassajakauman spektri	23
3.3.3 Neliömassajakauman mittaskaala.....	24
3.3.4 Mittalaitekohtaiset tunnusluvut	25
3.4 Formaation mittaaminen.....	25
3.4.1 Suorat ja epäsuorat mittausmenetelmät.....	25
3.4.2 Punnitus.....	26
3.4.3 Näkyvä valo	26
3.4.4 β -säteily	28
3.4.5 Radiografia	30
4 RAINANMUODOSTUS	31
4.1 Rainanmuodostuksen teoria.....	31
4.2 Flokit ja flokkaantuminen.....	33
4.2.1 Kuituverkostojen muodostuminen	33
4.2.2 Massan formaatiopotentiaali	34
4.2.3 Muut flokkaantumiseen vaikuttavat tekijät.....	38
4.3 Rainanmuodostus tasoviirakoneella.....	39
4.3.1 Lyhyt kierto	40
4.3.2 Perälaatikko	41
4.3.3 Rintapöytä.....	44
4.3.4 Vedenpoistoelimet	46
4.3.5 Yläpuolinen vedenpoistoyksikkö (formeri).....	48
4.3.6 Formaation parantamiseen tähtäävät ratkaisut	49
5 FORMAATION VAIKUTUS KARTONGIN PINTAOMINAISUUKSIIN	50
5.1 Yleistä	50
5.2 Sileys.....	51
5.3 Huokoisuus	52

5.4	Kiilto	52
5.5	Painettavuus	53
5.5.1	Neliväriarkkioffset-painatus	53
5.5.2	Painojäljen epätasaisuus	53
5.5.3	Painojäljen laikullisuus (mottling)	55
6	KIRJALLISUUSOSAN YHTEENVETO	59

KOKEELLINEN OSA

7	KOKEELLISEN OSAN JOHDANTO	62
7.1	Tavoitteet ja toteutus	62
7.2	Koesuunnittelu ja 3 ^m -faktorikokeet	63
7.3	Kaukopään kartonkikone 2	64
8	PERÄLAATIKOIDEN HALLINTASUUREIDEN OPTIMOINTI	67
8.1	Tavoitteet ja menetelmät	67
8.2	Pintakerros	68
8.3	Runkokerros	69
8.4	Taustakerros	71
8.5	Suihku/viira-nopeussuhde	72
8.6	Huuliaukko ja huuliero	74
8.7	Vaikutus kartongin laatuominaisuuksiin	74
9	KOEAJOT FORMAATION PARANTAMISEKSI	77
9.1	Tavoitteet ja menetelmät	77
9.2	Pintakerros	78
9.3	Runkokerros	79
9.4	Taustakerros	81
9.5	Runkokerroksen lyhytkuituisuus	83
9.6	Runkokerroksen neliömassa	84
9.7	Vaikutus kartongin pintaominaisuuksiin	85
9.7.1	Formaatio ja pintaominaisuudet	85
9.7.2	Sileys	86
9.7.3	Painojäljen visuaalinen arviointi	88
9.7.4	Painojäljen laikullisuus (mottling)	89
9.7.5	Muut pintaominaisuudet	90
9.8	Lyhytkuituisuuden kasvattamisen taloudelliset vaikutukset	91
10	PÄÄLLYSTÄMÄTÖN KOEAJO	92
10.1	Tavoitteet ja menetelmät	92
10.2	Tulosten tarkastelu	92
11	KILPAILIJAVERTAILU	97
11.1	Formaation vaikutus kartongin painettavuuteen ja sileyteen	97
11.2	Kuidunpituus ja pituusmassa	101
11.3	AFM-tarkastelu	102
12	TULOSTEN LUOTETTAVUUDEN ARVIOINTI	105
13	YHTEENVETO	107

LÄHDELUETTELO

LIITTEET

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Formaatiolla tarkoitetaan paperin materiaali jakauman tasaisuutta arkin tasossa. Formaatio on eräs paperin ja kartongin tärkeimmistä rakennetekijöistä. Se vaikuttaa melkein kaikkiin paperin tilasuureisiin ja käyttöominaisuuksiin. Hyvä formaatio antaa paperille edulliset ja tasaiset ominaisuudet. Tämän vuoksi kaikessa paperinvalmistuksessa pyritään saavuttamaan mahdollisimman hyvä formaatiotaso.

Tämän työn taustalla oli tarve parantaa graafisen Ensocoat-kartongin kilpailukyvyn kannalta keskeisiä pinta- ja painettavuusominaisuuksia. Tämän työn osalta tavoitteeseen päätettiin pyrkiä pohjakartongin formaatiota parantamalla, sillä muita pintaominaisuuksiin vaikuttavia kartonginvalmistuksen osa-alueita on tarkasteltu jo aiemmissa tutkimuksissa. Samalla voitaisiin myös kartoittaa perälaatikoiden ja viiraosan kyky tuottaa hyvän formaation omaavaa kartonkia kartonkikone 2:n tulevaa kehittämistyötä ajatellen.

Tässä työssä on tarkasteltu graafisen kartongin formaation parantamista tehdasmittakaavassa. Pilot- ja laboratoriomittakaavassa kokeita ei ole tehty, sillä kirjallisuudessa on esitetty runsaasti tutkimustuloksia formaation vaikutuksesta paperin ja kartongin pintaominaisuuksiin. Sen sijaan päällystettyjä tehdaspapereita käsitteleviä artikkeleita ei ole kirjallisuudessa julkaistu. Tehdasmittakaavassa saatuja tuloksia voidaan suoraan soveltaa tuotteen ja tuotannon kehittämiseen ilman mittakaavatarkasteluja ja tässä tapauksessa on mahdollista tuottaa myös uutta tietoa formaation vaikutuksista tehdasolosuhteissa.

1.2 Työn tavoitteet

Tällä työllä oli kaksi toisiinsa saumattomasti liittyvää tavoitetta. Ensimmäinen pyrittiin parantamaan pohjakartongin formaatiota. Toiseksi pyrittiin kartoittamaan pohjakartongin formaation vaikutuksia päällystetyn kartongin pintaominaisuuksiin.

Ensimmäisen tavoitteen saavuttamisen voitiin olettaa olevan varsin helppoa, sillä formaatiosta ja siihen vaikuttavista tekijöistä on olemassa runsaasti kirjallisuutta ja aiempia koetuloksia. Formaation parantamiseen pyrittiin tässä työssä perälaatikoiden hal-

lintasuureita optimoimalla, kartongin runkokerroksen keskimääräistä kuidunpituutta alentamalla ja muuttamalla neliöpainon jakautumista eri kerroksiin. Formaatiota parannettaessa saataisiin samalla kerättyä tietoa siitä, miten hyvän formaatitason omaavaa kartonkia nykyisellä kartonkikonekonstruktiolla ylipäättensä pystytään valmistamaan.

Toinen tavoite oli edeltäkäsikin tarkasteltuna hankalampi. Formaation tiedetään vaikuttavan lähes kaikkiin paperin ja kartongin tilasuureisiin, mutta käytännön tutkimustyössä näiden vaikutusten osoittaminen on usein havaittu vaikeaksi. Laboratoriomittakavassa vaikutukset ovat usein selviä, mutta jo päällystämättömällä hienopaperilla se on osoittautunut vaikeaksi ja päällystetyllä paperilla jopa mahdottomaksi. Tässä työssä tarkasteltu kartonki on lisäksi pintapuoleltaan kahteen kertaan päällystettyä, mikä vaikeuttaa edelleen formaation vaikutusten osoittamista.

Kirjallisuusosassa on käsitelty graafista kartonkia tuotteena, formaation käsitettä ja mittausmenetelmiä, rainanmuodostuksen teoriaa, tasoviiran rainanmuodostusprosessia sekä formaation vaikutusta kartongin pintaominaisuuksiin ja painettavuuteen.

Työn kokeellisessa osassa on keskitytty parantamaan kartongin formaatiota ja tutkimaan formaation vaikutusta kartongin pintaominaisuuksiin neljän kartonkikonekoeajon avulla. Lisäksi kilpailijavertailun avulla on tarkasteltu graafisten kartonkien formaation vaikutusta pintaominaisuuksiin ja painojälkeen.

1.3 Työn rajaukset

Tämän työn kokeellisessa osassa ei ole käsitelty massojen jauhatusta, formerin hallintasuureiden vaikutusta, päästölistakaluston muuttamista, kartongin päällystystä eikä kartongin kalanterointia. Näiden tekijöiden vaikutus kartongin formaatioon ja ominaisuuksiin on pyritty vakioimaan siten, että itse tutkittavien muuttujien vaikutukset voitaisiin selvästi havaita.

Kartonkikone 2:lla käytettyjen valkaistujen sellumassojen jauhatus on optimoitu antamaan kartongille hyvä taivutusjäykkyys ja palstautumislujuus, minkä vuoksi formaation parantaminen jauhatusta katkovampaan suuntaan muuttamalla ei tule kyseeseen.

Runkokerroksen SymFormer MB -formerin optimointi jätettiin myös tämän työn ulkopuolelle, sillä formerin nykyinen ajomalli on vuosien varrella osoittanut hyväksi kartongin tasaisen pohjanmuodostuksen kannalta. Formerin hallintasuureiden optimointi olisi lisäksi vaatinut niin suuren työmäärän, ettei sen katsottu vastaavan siitä saatavaa hyötyä. Myöskään viiraosan päästolistakalustusta ei ryhdytty muuttamaan.

Kartongin päällystys ja kalanterointi muodostavat myös oman kokonaisuutensa, joka ei suoranaaisesti liity pohjakartongin formaatioon, mutta jolla on keskeinen merkitys kartongin pintaominaisuuksien muodostumisessa. Formaatio sen sijaan vaikuttaa sekä teräpäällystysen päällystemäärän vaihteluun että kalanteroidun kartongin pintaominaisuuksiin.

2 GRAAFISEN KARTONGIN TUOTEANALYYSI

2.1 Graafinen kartonki tuotteena

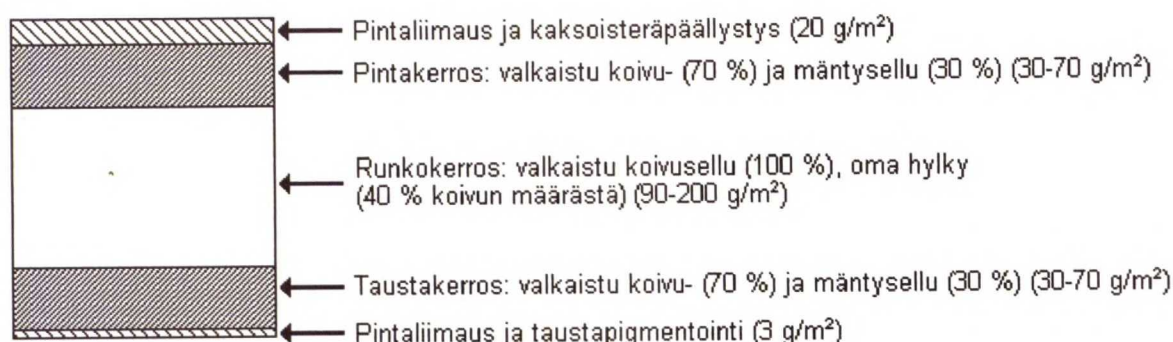
2.1.1 Graafiset kartonkilajit

Kartongit (paperboards) voidaan jaotella niiden lopullisen käyttötarkoituksen mukaan sisäpakkauskartonkeihin (cartonboards), ulkopakkauskartonkeihin (containerboards) sekä erikoiskartonkeihin (special boards) /1/. Graafiset kartongit ovat sisäpakkaus-kartonkeja, tyypillisiä lajeja ovat valkaistut sellukartongit (SBS, solid bleached sulpha-te), taivekartongit (FBB, folding boxboard) ja päällystetyt kierrätyskuitua sisältävät kartongit (WLC, white lined chipboard). SBS-kartonkien etuja muihin sisäpakkauskar-tonkeihin verrattuna ovat korkea vaaleus, puhtaus (hajuttomuus ja mauttomuus, ros-kattomuus), lujuus, sileyys, korkealuokkainen painojälki ja erinomainen jalostettavuus /2/.

Graafisten SBS-kartonkien neliömassa vaihtelee välillä 150-400 g/m². SBS-kartongit ovat rakenteeltaan Euroopassa kolmi- tai useampikerroksisia, Pohjois-Amerikassa usein yksikerroksisia /1/. Raaka-aineena käytetään pelkästään valkaistuja pitkä- ja lyhytkuituisia sellumassoja. Täyteaineita ei yleensä käytetä ollenkaan. Kartonki voi olla joko molemmilta tai vain toiselta puoleltaan päällystettyä. Taustapuolella voidaan käyttää myös pigmentointia parantamaan visuaalista ulkonäköä ja painettavuutta.

2.1.2 Ensocoat-kartonki

Ensocoat-kartonki on puhdas sellukartonki, joka on toiselta puoleltaan kahteen ker-taan teräpäällystetty ja toiselta puolelta kevyesti pigmentoitu. Kartongin pinta muo-dostaa erinomaisen alustan korkeatasoiseen graafiseen painatukseen. Pigmentointi mahdollistaa myös kartongin taustapuolen painamisen esimerkiksi postikorttien tai kosmetiikkapakkausten valmistuksessa. Ensocoat-kartongin rakenne on esitetty ku-vassa 1.



Kuva 1. Ensocoat-kartongin rakenne.

Ensocoat-kartongin käyttökohteet voidaan jakaa kahteen ryhmään. Graafiseen käyttöön menee 60 % ja vaativaan sisäpakkaukseen 40 % tuotannosta. Kartonki painetaan lähes poikkeuksetta arkkioffset-menetelmällä (sheet-fed offset). Tyypillisiä graafisia käyttötarkoituksia ovat peli- ja keräilykorttien, postikorttien, käyntikorttien, pääsylippujen, kalentereiden ja karttojen sekä kirjojen ja aikakauslehtien kansien painaminen. Painomenetelmältään arkkioffset-painatuksesta poikkeavat aikakauslehtien kannet, jotka painetaan usein HSWO-menetelmällä sekä erilaiset vaate- ja tuote-etiketit, joita painetaan flekso- ja lämpösiirtomenetelmillä. Korkealuokkaisten pakkauksen osalta tärkeimpiä graafisen kartongin käyttökohteita ovat kosmetiikka- ja lääkepakkaukset, makeispakkaukset, savukerasiat ja päällystetyt kertakäyttökupit. Näistä kertakäyttökupit painetaan flekso-menetelmällä. Graafista kartonkia käytetään myös laminoituna aaltopahvin pintaan, jolloin aaltopahvipakkaukselle saadaan korkealuokkainen painopinta.

2.1.3 Graafinen kartonki ja päällystetty hienopaperi

Graafinen kartonki kilpailee monessa käyttötarkoituksessa suoraan päällystetyn hienopaperin ja taidepainopaperin kanssa. Päällystettyjen hienopaperien neliömassat vaihtelevat välillä $90\text{-}170 \text{ g/m}^2$ ja ne ovat rakenteeltaan yksikerroksisia [3]. Raaka-aineena käytetään valkaistua pitkä- ja lyhytkuituista sellua. Täyteaineannostus vaihtelee välillä 30-45 %. Päällystetty hienopaperi on molemmilta puoliltaan kahteen kertaan päällystettyä. Taidepainopaperi on yleensä kolmeen kertaan päällystettyä hienopaperia, jonka neliömassa vaihtelee välillä $100\text{-}230 \text{ g/m}^2$.

Graafisessa loppukäytössä kartongin keskeinen ominaisuus ja kilpailuetu hienopaperiin verrattuna on jäykkyys. Tällöin voidaan esimerkiksi vuosikertomusten kannet tai julisteet valmistaa alhaisemman neliömassan omaavasta kartongista kuin olisi mah-

dollista päällystettyä hienopaperia käytettäessä. Hienopaperin painettavuus on kuitenkin yleensä parempi kuin graafisen kartongin.

2.2 Graafisen SBS-kartongin tuoteanalyysi

Tuoteanalyysin tehtävänä on selvittää ne tuotteen mitattavissa olevat ominaisuudet, jotka ovat tärkeitä kuvattaessa tuotteen käyttökelpoisuutta. Näitä ominaisuuksia kutsutaan tilasuureiksi /4/.

Lopputuotteen tilasuureisiin voidaan vaikuttaa raaka-aineiden valinnalla ja valmistusprosessin hallintasuureilla. Hallintasuureiden käyttökelpoisuutta säätelevät prosessin rakenneparametrit. Valmistusprosessissa esiintyy aina myös häiriösuureita, joiden vaikutuksia tilasuureisiin pyritään minimoimaan /5/.

Graafisen SBS-kartongin toiminnalliset ominaisuudet voidaan jakaa kolmeen ryhmään. Loppukäyttöön liittyvät ominaisuudet ovat valmiiden pakkausten ja painotuotteiden toiminnallisia ominaisuuksia. Jalostukseen liittyvät toiminnalliset ominaisuudet kuvaavat kartongin käyttökelpoisuutta pakkausten valmistuksessa ja kirjojen tai lehtien kansien valmistuksessa. Painatukseen liittyvät toiminnalliset ominaisuudet muodostavat oman ryhmänsä.

Graafisten kartonkien yleisesittelystä voidaan havaita, että erilaisia käyttökohteita on useita ja käytettyjä painomenetelmiä on monia. Kaikki nämä tekijät vaikuttavat myös kartongilta vaadittaviin ominaisuuksiin luoden usein myös ristiriitaisia vaatimuksia. Yhden ja saman tuotteen tulisi kuitenkin täyttää kaikki nämä vaatimukset. Liian monimutkaisuuden välttämiseksi tässä tuoteanalyysissä rajoitutaan arkkioffsetmenetelmällä painettujen graafisten tuotteiden ja tavallisimpien pakkausten käyttöalueisiin. Taulukossa 1 on esitetty graafisen kartongin tuoteanalyysi (taulukon tiedot koottu lähteistä /6, 7, 8, 9/).

Taulukko 1. Graafisen kartongin tuoteanalyysi.

Kartongin toiminnallinen käyttäytyminen	Mitattavissa olevat kartongin tilasuureet
Loppukäytössä - pakkauksen / kannen / kortin myyvyys - käsiteltävyys - suojauskyky - puhtaus ja elintarvikekelpoisuus - kustannustehokkuus	- vaaleus ja vaaleuden pysyvyys - värisävy - kiilto - sileys - visuaalinen puhtaus, roskaluku - taivutusjäykkyys - veto- ja repäisylujuus - taivutusjäykkyys - puhkaisu-, veto- ja repäisylujuus - taivutusjäykkyys - puristuslujuus - palstautumislujuus - haju ja maku - kemikaalien kulkeutuminen - uuteainepitoisuus - mikrobiologinen puhtaus - raaka-ainekustannukset - prosessikustannukset
Jalostuksessa - sivuliimattavuus - aihoiden suoruus - hyvä nuutattavuus ja leikattavuus - pölyämättömyys	- vedenabsorptiokyky - huokoisuus ja huokoskokojakauma - pintalujuus - palstautumislujuus - kosteus - mittapysyvyys - kuituorientaatio - käyristymä - paksuus - kokoonpuristuvuus - vetolujuus - murtovenymä - kimmokerroin - palstautumislujuus - taivutusjäykkyys - veto- ja repäisylujuus - pintalujuus
Painatuksessa - ajettavuus painokoneella - painovärien kohdistettavuus - painojäljen tasaisuus - yksityiskohtien toistokyky - laaja sävyvaraus ja korkea densiteetti - korkea painovärien kiilto - pölyämättömyys	- käyristymä - taivutusjäykkyys - mittapysyvyys - palstautumislujuus - kitkakerroin - kosteus - mittapysyvyys - venymä - formaatio - sileys - ei kudonmarkkeerausta - veden- ja öljynabsorptiokyky - huokoisuus ja huokoskokojakauma - pintaenergia - vaaleus - sileys - vaaleus - sileys - kiilto - huokoisuus - öljynabsorptiokyky - huokoisuus ja huokoskokojakauma - sileys - painamaton kiilto - pintalujuus - märkähankauslujuus

Mitattavissa olevien tilasuureiden kohdalla tulee huomata, että niillä kaikilla esiintyy vaihtelua tuotteen ajo- ja poikkisuunnassa eli niillä on profiili. Vaikka jokin tilasuure ei olisikaan kriittinen jonkin toiminnallisen käyttäytymisen kannalta, voi tuotteessa esiintyvän tilasuureen huono profiili kuitenkin vaikuttaa käyttäytymiseen. Esimerkiksi paksuusprofiililla on suuri merkitys aihoiden pinottavuuteen, ajettavuuteen ja painojäljen tasaisuuteen, vaikkei paksuudella itsessään olekaan suurta merkitystä. Laatuominaisuuksien pieni vaihtelu radan poikki- ja ajosuunnassa eli hyvä profiili on jokaisen tilasuureen osalta tavoiteltava asia.

2.3 Graafisen kolmikerroskartongin edut

2.3.1 Monikerrosrainaustekniikan käytön perusteet

Alunperin kartonkeja ryhdyttiin valmistamaan monikerrosrainaustekniikalla, jotta voitaisiin saavuttaa haluttu korkea neliömassa /10/. Monikerroskartongilla on kuitenkin myös useita laadullisia etuja verrattuna yksikerroksiseen kartonkiin /11/. Monikerroskartonkia pystytään tuottamaan suuremmalla tuotantonopeudella, raaka-aineiden käyttöä pystytään optimoimaan ja kartongin laatuominaisuuksia, etenkin taivutusjäykkyyttä ja formaatiota, pystytään parantamaan. Suotauttamalla tuote kahdella erillisellä viiralla ja yhdistämällä nämä kerrokset voidaan viirojen kokonaispituus pienentää noin puoleen verrattuna suotauttamiseen yhdellä viiralla /10/. Tällöin voidaan saavuttaa merkittäviä kustannus- ja tilasäästöjä.

2.3.2 Formaatio

Suotautettaessa korkeaneliömassaisen lopputuotteen kerrokset erikseen voidaan neliömassan pienimittakaavainen vaihtelu eli formaatio hallita paremmin kuin vastaavalla yksikerroksisella tuotteella /10, 12/. Monikerroskartongin formaatio muodostuu yksittäisten kerrosten formaatioiden yhteisvaikutuksesta. Jokaisen kerroksen formaatio on muiden kerrosten formaatiosta riippumaton valmistettaessa kartonkia moniviiratekniikalla. Monikerroskartongin formaation tunnusluvut voidaan siten laskennallisesti johtaa kerrosten tunnetuista formaation tunnusluvuista.

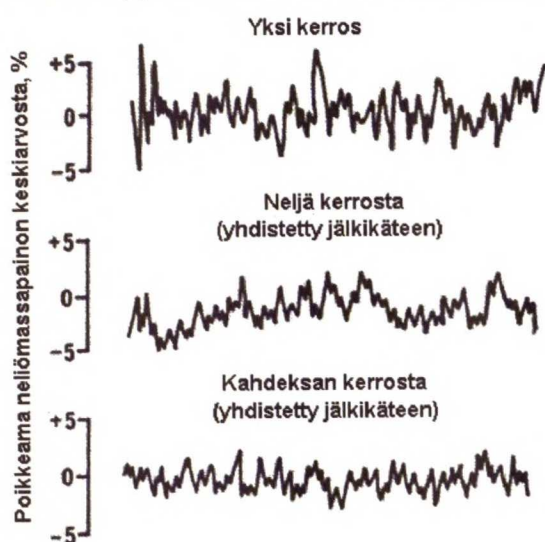
Formaatio kuvaa kartongin pienimittakaavaista neliömassahajontaa. Hajontalukuja käytettäessä on huomioitava, että hajonnat summautuvat neliöllisesti. Kolmikerroksisen tuotteen formaatio voidaan siten laskea kaavasta /10/

$$n_{kok} = \sqrt{\frac{m_1 n_1^2 + m_2 n_2^2 + m_3 n_3^2}{m_1 + m_2 + m_3}}, \quad (1)$$

missä

n_{kok} on koko kartongin formaatio (normeerattu neliömassahajonta, $\sqrt{g/m}$),
 n_x on kerroksen x formaatio ($\sqrt{g/m}$) ja
 m_x on kerroksen x neliömassa (g/m^2).

Kingsnorth et al. /13/ ovat selvittäneet monikerrosviiraratkaisun vaikutusta neliömassaprofiilin tasaisuuteen. Kuvassa 2 on esitetty kerrosten lukumäärän vaikutus neliömassaprofiilin tasaisuuteen. Neliömassavaihtelun pienentyminen kerrosten lukumäärän kasvaessa selittyy kerrosten satunnaisvaihteluiden kompensoitumisella.



Kuva 2. Kerrosten lukumäärän vaikutus monikerroskartongin neliömassavaihteluun /13/.

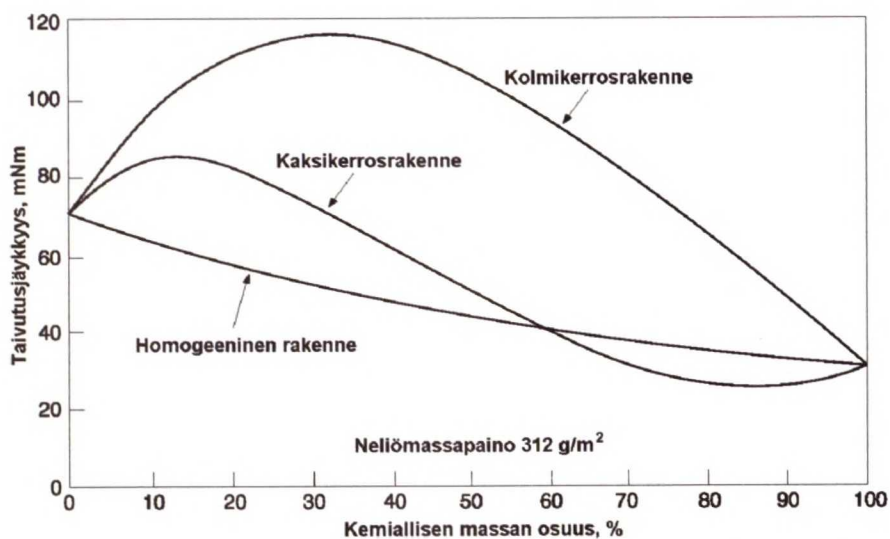
2.3.3 Jäykkyys

Insinöritieteistä tuttu I-palkin käsite soveltuu käytettäväksi myös monikerroksisen kartongin analysointiin /14/. I-palkkirakenteessa kahta taivutusjäykkää kerrosta pitää erillään kerros, jonka leikkaus- ja puristuslujuus on korkea. Tällaisella rakenteella saavutetaan korkea taivutusjäykkyys/paino -suhde, joka mahdollistaa alhaisemman neliömassan käytön samalla jäykkyydellä tai vastaavasti paremman jäykkyyden samalla neliömassalla verrattuna yksikerrosrakenteeseen.

I-palkkiteorian mukaisesti paras taivutusjäykkyys saavutetaan monikerroksisella kartongilla silloin, kun kartongin keskikerroksen tiheys on alhainen ja pintakerrosten tiheys on korkea /15, 16, 17/. Kerrosten tiheyttä voidaan säätää jauhatusta muuttamalla. Alhaisen tiheyden keskikerros on paksu ja korkean tiheyden pintakerrosten kimmo-

kertoimet ovat korkeat. Tällöin kartongin taivutusjäykkyys muodostuu korkeaksi, sillä kartongin taivutusjäykkyyden tiedetään olevan verrannollinen paksuuden kolmanteen potenssiin ja suoraan verrannollinen kimmokertoimen arvoon.

Taivutusjäykkyys riippuu myös kerrosrakenteesta ja käytettyjen massojen massaosuuksista. Kuvassa 3 on esitetty kolmen erilaisen rakenteen laskennallinen taivutusjäykkyys massaosuuden funktiona. Kuvasta nähdään, miten kolmikerrosrakenteella saavutetaan aina parempi taivutusjäykkyys kuin yksi- tai kaksikerrosrakenteella.



Kuva 3. Laskennalliset taivutusjäykkyydet homogeeniselle (yksikerroksiselle), kaksikerroksiselle ja kolmikerroksiselle kartongille. Kaksikerroksisessa kartongissa mekaanista massaa on vain toisessa kerroksessa ja kolmikerroksisessa vain keskikerroksessa /15/.

Kuvasta 3 voidaan havaita, että korkein taivutusjäykkyys saavutetaan yksikerrosrakenteella silloin, kun se on valmistettu kokonaan mekaanisesta massasta ja kolmikerrosrakenteella silloin, kun keskikerroksen massasta noin 70 % on mekaanista massaa. SBS-kartongeissa mekaanisen massan käyttö ei kuitenkaan ole suotavaa. Keskikerroksen paksuuteen ja sitä kautta taivutusjäykkyyteen voidaan raaka-ainetekijöiden osalta vaikuttaa vain pitkä- ja lyhytkuitumassojen suhteella ja hylkymassan annostelumäärällä.

Carlsson et al. /14/ havaitsivat aaltopahvin taivutusjäykkyyttä tutkiessaan symmetrisellä rakenteella saavutettavan jopa 20 % parempi taivutusjäykkyys kuin epäsymmetrisellä rakenteella. Sama laskentatapa soveltuu myös symmetriselle kolmikerroskartongille, jota voidaan siten pitää optimaalisena rakenteena taivutusjäykkyyden kannalta.

Kerrosrakenteisen materiaalin taivutusjäykkyys pystytään laskemaan kerrosten tunnettujen kimmokertoimien ja paksuuksien avulla. Laskemiseen soveltuvista menetelmistä Carlssonin ja Fellersin /18/ esittämä menetelmä on yksinkertaisempi käyttää kuin Lueyn /19/ esittämä menetelmä, joka edellyttää laskennan kannalta keskeisen neutraalitasen sijaintiin liittyviä monimutkaisia tarkasteluja.

2.3.4 Tuotannon tehokkuus

Vedenpoisto viiraosalla on hyvin monimutkainen tapahtuma, johon vaikuttavat rainan sakeus, materiaalikoostumus, kemialliset olosuhteet, huulisuihkun ja viiran ominaisuudet sekä vedenpoistoa aiheuttavien painepulssien luonne /20/. Käytännössä vedenpoistoa arvioidaan empiiristen yhtälöiden avulla, joista tunnetuin on Wahlströmin yhtälö /21/

$$t = \frac{G}{c} (\Delta p_m)^{-n} m^\alpha, \quad (2)$$

missä

t	on rainan suotautumiseen kuluva aika,
Δp_m	on rainan yli vaikuttava vedenpoistopaine,
c	on rainan sakeus,
m	on suotautunut neliömassa ja
G, α ja n	ovat kokeellisia vakioita (vakion α arvo on välillä 1,7...3,5 ja vakion n arvo on välillä 0,35...0,53).

Yhtälöstä 2 voidaan havaita, miten suotautumiseen kuluva aika pitenee eksponentiaalisesti muodostuvan rainan neliömassan kasvaessa. Korkeaneliömassaisen rainan suotauttaminen yhdellä kertaa vaatii siis joko huomattavasti pidemmän viiraosan tai hitaamman tuotantonopeuden verrattuna tilanteeseen, jossa raskas raina suotauteaan osissa, jotka yhdistetään myöhemmin. Kumpikaan näistä vaihtoehdoista ei ole taloudellisessa mielessä hyväksyttävissä, joten monikerrosrainaustekniikan käyttö nousee kilpailukykyisen tuotannon edellytykseksi.

2.3.5 Raaka-ainekoostumuksen optimointi

Valmistettaessa kartonkia kolmikerrosviiraosan omaavalla kartonkikoneella voidaan jokaisen kerroksen kuitukoostumus optimoida lopputuotteen paksuuden, jäykkyyden, painettavuuden ja raaka-ainekustannusten kannalta [1]. Kolmikerrosrakenteessa eri kerroksilta vaadittavat toiminnalliset ominaisuudet poikkeavat toisistaan. Pinta- ja taustakerrokselta vaaditaan korkeaa kimmokerrointa, hyvää pinalujuutta, sileyttä, palstautumisljuutta, vaaleutta ja päällystettävyyttä. Runkokerroksen tärkein tehtävä on I-palkkiteorian mukaisesti pitää pinta- ja taustakerrokset mahdollisimman kaukana toisistaan eli antaa kartongille paksuutta hyvän jäykkyyden saavuttamiseksi. Runkokerroksen vaikutus koko kartongin formaatioon ja jäykkyyteen on suuri, joten massa-koostumus ja jauhatus pyritään optimoimaan korkean bulkin ja hyvän formaation saavuttamiseksi. Runkokerrokselta vaaditaan myös hyvää palstautumisljuutta.

3 FORMAATIO

3.1 Yleistä

Formaatiolla tarkoitetaan paperin neliömassan pienimittakaavaista vaihtelua paperin tasossa /12, 22, 23, 24/. Pienimittakaavainen viittaa tässä yhteydessä neliömassavaihtelun aallonpituuteen. Formaation sanotaan olevan sitä parempi, mitä vähemmän paperin neliömassa vaihtelee. Hyvällä formaatiolla tarkoitetaan siis tasaista formaatiota. Neliömassavaihtelu on ominaista paperinvalmistusprosessille. Tätä vaihtelua synnyttävät prosessin stokastinen luonne ja kuitumateriaalin taipumus muodostaa verkostoja eli flokkeja.

Formaatio-käsitteen käyttö on usein horjuvaa ja epätarkkaa. Usein formaatio ja paperin pohja samaistetaan, ja joskus formaatio sekoitetaan varsinaiseen neliömassavaihteluun. Etenkin englanninkielisessä kirjallisuudessa esiintyy formaation ja rainanmuodostuksen käsitteiden sekoittumista (formation vs. forming) /20, 25/.

Formaatio on lähes kaikkien paperi- ja kartonkilajien tärkeimpiä rakennetekijöitä /5, 12, 24/. Formaation tasaisuus vaikuttaa melkein kaikkiin paperin tärkeisiin tilasuureisiin ja käyttöominaisuuksiin. Formaation tasaisuus pyritään paperinvalmistuksessa saamaan mahdollisimman hyväksi.

Formaation syntyyn vaikuttavat merkittävästi sekä massan flokkaantuminen että syntyneiden flokkien hajoaminen perälaatikossa ja viiraosalla /22/. Keskeiset formaatioon vaikuttavat tekijät on esitetty taulukossa 2 (taulukon tiedot koottu lähteistä /5, 20, 22, 26/). Näistä tärkeimmät massasulpun flokkaantumiseen ja sitä kautta formaatioon vaikuttavat tekijät ovat kuidunpituus ja kuitulietteen sakeus.

Taulukko 2. Eri tekijöiden vaikutus paperin ja kartongin formaatioon.

Formaatioon vaikuttavat tekijät	Formaatio paranee, kun
Massasulpun ominaisuudet <ul style="list-style-type: none"> - puulaji - massalaji - kuidunpituus - jauhatusaste - massan lämpötila - käytetyt retentioaineet ja liimat - käytetyt deflokkauskemikaalit 	<ul style="list-style-type: none"> - käytetään eukalyptusta koivun sijaan - lyhytkuituisen massan osuus kasvaa - kuidunpituus alenee - (vaikutus kuidunpituuteen) - (vaikutus epäselvä) - annostelu pienenee - annostelu kasvaa
Ajotapatekijät <ul style="list-style-type: none"> - perälaatikkosakeus - huuliero/huuliaukko (L/b) -suhde - huulisuihkun ja viiran nopeusero - vedenpoiston luonne - viirakaluston ajotapa - koneen nopeus 	<ul style="list-style-type: none"> - sakeus alenee - huulisuihkun iskukohta- ja kulma optimoidaan - nopeusero optimoidaan - vedenpoisto on jaksottaista - turbulenssia lisätään - (vaikutus epäselvä)
Rakennetekijät <ul style="list-style-type: none"> - perälaatikon rakenne - viiraosan rakenne - viirakalusto (päästölistat, rekisteritelat, imulaatikot) 	<ul style="list-style-type: none"> - käytetään hydraulista perälaatikkoa ilmatyynyperälaatikon sijaan - käytetään yläpuolista vedenpoistoyksikköä tasoviiralla ja kartongeilla monikerrosviiraosaa - turbulenssia lisätään

Formaation piiriin kuuluvan neliömassavaihtelun aallonpituuden rajat vaihtelevat lähteestä riippuen. Alarajaksi on yleisesti hyväksytty 0,1 mm /20, 27, 28/, yläraja vaihtelee välillä 40 mm /20, 28/ ja 100 mm /5/. Varsin yleisesti käytetty yläraja on myös 70 mm /23, 27/.

Pienimittakaavaisen neliömassavaihtelun piiriin kuuluvan aallonpituusalueen rajauksessa esiintyvä vaihtelu johtuu siitä, että sitä on tehty erilaisista lähtökohdista käsin ja erilaisiin käyttötarkoituksiin. Normanin /20, 28/ rajausta perustuu neliömassavaihtelua synnyttävien mekanismien mittakaavoihin. Alle 0,1 mm aallonpituuden vaihtelut johtuvat pääasiassa partikkelikokojakaumasta ja kolloidisista vuorovaikutuksista, kun taas yli 20 mm aallonpituuden vaihtelut johtuvat yleensä epästabiileista virtausoloista perälaatikossa ja viiraosalla. Tällöin formaation ylärajaksi on asetettava noin 40 mm. Saran mukaan /27/ formaation ja normaalin (pidempimittakaavaisen) neliömassavaihtelun välinen raja sijaitsee aallonpituusalueella 70-100 mm. Tämän vuoksi 70 mm on sopiva yläraja formaatiolle, sillä se mahdollistaa vielä formaation tarkan mittauksen samalla kuitenkin eliminoiden yksittäisten flokkien vaikutuksen (flokkin koko on yleensä alle 70 mm). Kajanto /24/ rajaa formaation aallonpituusaluetta myös ihmissilmän herk-

kyiden avulla, joka on suurimmillaan normaalilla lukuetaisyysdellä aallonpituusalueella 2–40 mm. Formaation ja painojäljen epätasaisuuden välisen yhteyden perusteella tämä on myös formaation kannalta tärkein aallonpituusalue. Kajannon /29/ mukaan ei ole kuitenkaan tarkoituksenmukaista asettaa tarkkoja rajoja formaatiolle siihen vaikuttavien tekijöiden runsaslukuisuuden vuoksi. Sen sijaan Kajanto esittää pienimittakaavaisen neliömassavaihtelun käsittävän aallonpituusalueen millimetrin kymmenesosista muutamaan senttimetriin.

Saran saamien tulosten mukaan /27/ formaatio vaihtelee huomattavasti poikkisuunnassa paperiradan eri kohtien välillä. Formaatiolla havaittiin siis olevan poikkisuuntainen profiili, joka seuraa lisäksi varsin hyvin neliömassaprofiilia. Konesuuntainen vaihtelu osoittautui sen sijaan pieneksi. Formaation profiilien vuoksi on tärkeää, että formaation ja muiden paperin ominaisuuksien välistä yhteyttä tutkittaessa kaikki mittaukset tehdään samasta arkista /23/. Milloin tämä ei ole mahdollista esimerkiksi suuren näytemäärän vuoksi, tulisi mittaukset tehdä aina samasta kohtaa poikkirataa.

3.2 Formaation määritelmä

Formaation määritelmiä on useita erilaisia, jotka poikkeavat toisistaan laajuutensa ja sisältönsä osalta. Kansainvälisen standardin ISO 4046 mukaan formaatio on tapa, jolla kuidut ovat jakautuneet, järjestyneet ja sekoittuneet muodostaakseen paperin. Suomalaisen standardin SFS 3215 mukaan formaatio on materiaalijakauman tasaisuus arkin tasossa. Aiemmin katsottiin myös kuituorientaation kuuluvan formaatioon käsitteeseen /30/, mutta nykyisin viitataan yleensä vain materiaalijakaumaan. Useimmiten materiaalijakauman katsotaan käsittävän kaikki paperin kiinteät komponentit /30, 31/, joskus vain kuidut /32/.

Formaatiota voidaan toisaalta ajatella myös paperin rakenteen täydellisesti kuvaavana käsitteenä /24, 29/. Tällöin se huomioisi kuitujen ja muun kiintoaineen jakautumisen paperin tasossa ja z-suunnassa mikrometrimittakaavassa. Tällainen tarkastelu sisältäisi myös paperin pinnan karheuden, z-suuntaisen rakenteen ja kuituorientaation. Tällainen määritelmä on kuitenkin käytännössä toimimaton, sillä edes neliöpainoa ei voida määrittää mikrometrin tarkkuudella.

Formaatioon läheisesti liittyvä käsite on paperin pohja. Jotkut paperisanastot samais-tavat formaation ja paperin pohjan /30, 31/, mikä on yleinen tapa myös paperiteolli-

suuden piirissä. Tämä on kuitenkin väärin. Paperin pohja on standardin SFS 3215 mukaan paperin rakenne valoa vasten arvosteltuna eli valoa vasten tarkasteltaessa havaittavaa paperin valon transmission pienimittakaavaista tasaisuutta /33/. Paperin pohjan antamaa visuaalista vaikutelmaa voidaan kuvata esimerkiksi adjektiiveilla tasainen, pilvinen, flokkinen, ryynimäinen tai jyvämäinen /23, 33, 34/. Paperin transmitanssi ei kuitenkaan riipu pelkästään neliömassasta vaan myös arkin materiaali koostumuksesta ja valmistusprosessista. Paperin optinen tiheys vaihtelee erityisesti täyteainepitoisilla ja kalanteroiduilla papereilla /24, 35/. Paperin pohjan arviointi on subjektiivinen menetelmä, joka riippuu paljolti havaitsijasta, ihmisen näköaistin ominaispiirteistä ja pohjaa kuvaavien käsitteiden erilaisesta hahmottamisesta /22, 29/. Monet optiset formaatiomittarit on tästä huolimatta kalibroitu siten, että ne korreloivat paperin antaman visuaalisen vaikutelman kanssa, mikä johtaa helposti harhaanjohtaviin tuloksiin /24, 29/.

3.3 Formaation tunnusluvut

3.3.1 Neliömassajakauman intensiteetti

Formaation kattava kuvaaminen vaatii kahden tunnusluvun käyttöä /20, 24, 25, 28/. Toisen tulisi kuvata formaation intensiteettiä eli määrittää neliömassavaihtelun kokonaismäärä ja toisen tulisi taas kuvata vaihtelun mittaskaalaa eli pienten ja suurien flokkien jakautumaa. Vaihtelun voimakkuutta kuvaamaan sopivia tunnuslukuja ovat neliömassan keskihajonta σ (g/m²) ja siitä johdetut normeerattu neliömassahajonta n ja neliömassan variaatiokerroin f . Normeerattu neliömassahajonta n lasketaan neliömassan keskihajonnasta kaavalla

$$n = \frac{\sigma}{\sqrt{m}} \quad (3)$$

ja neliömassan variaatiokerroin f kaavalla

$$f = \frac{\sigma}{m} \quad (4)$$

joissa m on paperin keskimääräinen neliömassa (g/m²). Kaavasta 3 nähdään myös, että normeeratun neliömassahajonnan (kutsutaan myös formaatioindeksiksi F , esim.

/10/) yksikkö on $\sqrt{g/m}$. Suureella f ei ole yksikköä, ja se ilmoitetaan usein prosenttilukuna. Normeeratun neliömassahajonnan laskentakaava perustuu siihen oletukseen, että neliömassavaihtelu noudattaa binomijakaumaa /24/. Binomijakaumaa voidaan puolestaan approksimoida Poisson-jakaumalla, jonka hajonta on \sqrt{n} , kun näytejoukon koko on n . Tämän vuoksi normeeratun neliömassahajonnan avulla on mahdollista tarkastella myös neliömassaltaan toisistaan poikkeavia näytteitä. Neliömassahajonta voidaan laskea kaikilla formaationmittausmenetelmillä eikä sen mittaamiseen tarvittava pistejoukko ole kovin suuri.

3.3.2 Neliömassajakauman spektri

Näytteestä mittauksessa saatavan neliömassasignaalin vaihtelun jakautumista eri taajuuksille kuvataan tehospektrillä /12, 23, 24, 25, 28/. Koko tehospektrin $T(k)$ alle jäävä pinta-ala edustaa neliömassavaihtelun varianssia σ^2 , joka voidaan laskea integroimalla yksiulotteinen tehospektri

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} T(k) dk, \quad (5)$$

jossa k on paikkataajuus.

Formaation jakautumista eri aallonpituuksille voidaan suoraan tutkia aallonpituusspektristä $T(L)$, joka saadaan muunnoksella

$$T(L) = k^2 T(k), \quad (6)$$

missä

k on paikkataajuus,
 L on aallonpituus ja
 $T(k)$ on yksiulotteinen tehospektri paikkataajuusavaruudessa.

Myös aallonpituusspektristä voidaan laskea neliömassavaihtelun varianssi σ^2 integroimalla sen alle jäävä pinta-ala

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} T(L) dL. \quad (7)$$

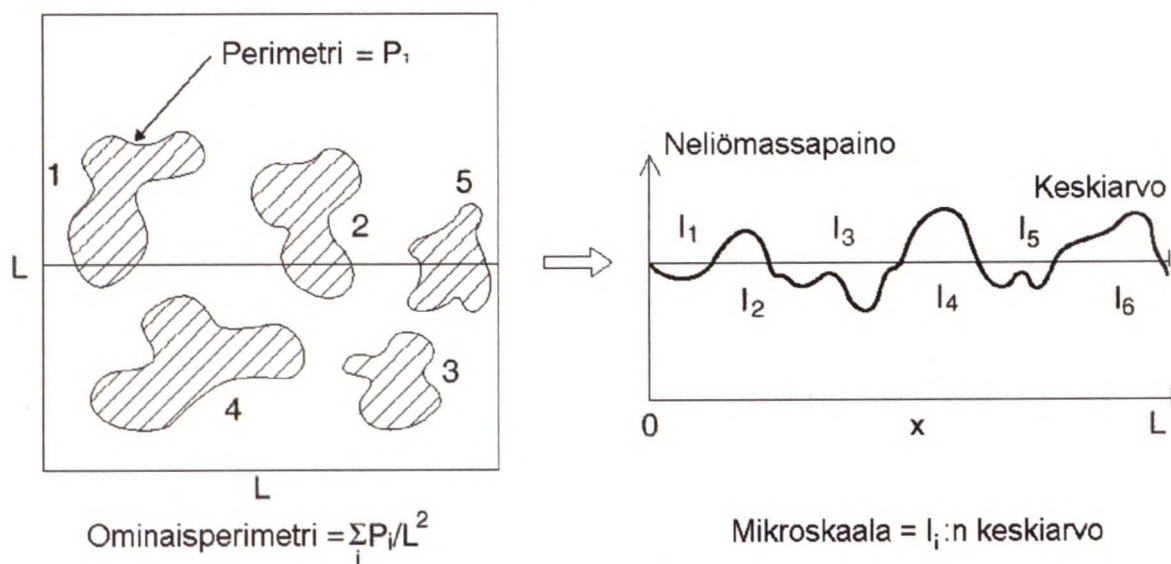
Neliömassavaihtelu voidaan jakaa tietylle rajoitetulle kaistalle eli aallonpituusalueelle L_2-L_1 integroimalla aallonpituusspektri

$$\sigma_{12}^2 = \int_{L_1}^{L_2} T(L) dL. \quad (8)$$

Tämän jaottelun avulla on mahdollista analysoida eri syntymekanismien vaikutusta formaatioon, kun tunnetaan eri mekanismeille tyypilliset aallonpituusalueet [25, 28]. Samalla periaatteella voidaan analysoida myös paperissa esiintyviä kudossjälkiä ja paperin rakenteen anisotropiaa.

3.3.3 Neliömassajakauman mittaskaala

Neliömassahajonta voidaan laskea kaikkien formaation mittaukseen käytettyjen menetelmien antamista tuloksista eikä sen määrittämiseen tarvittava mittapisteiden joukko ole kovin suuri [36]. Formaation mittaskaalaa kuvaavien suureiden laskemiseen tarvitaan sen sijaan kaksiulotteinen kuva näytteestä [24, 25, 36, 37]. Formaation mittaskaalaa luonnehditaan usein ominaisperimetrillä tai mikroskaalalla. Näiden käsitteiden määritelmiä on havainnollistettu kuvassa 4.



Kuva 4. Ominaisperimetrin ja mikroskaalan määritelmät [36].

Ominaisperimetri saadaan siis laskettua jakamalla arkki kahteen alueeseen, joista toisessa neliömassa on korkeampi ja toisessa alhaisempi kuin keskimääräinen neliömassa [24, 25, 36, 37]. Ominaisperimetri on tällöin alueiden välisen rajaviivan pituus

pinta-alayksikköä kohden. Mikroskaala kuvaa käytännössä samaa asiaa kuin ominaisperimetri. Mikroskaala on formaation aallonpituusspektristä laskettu aallonpituuden painotettu keskiarvo. Pieni mikroskaalan arvo kuvaa rakeista formaatiota ja suuri arvo pilvistä formaatiota.

3.3.4 Mittalaitekohtaiset tunnusluvut

Edellä esitetyt formaatioparametrit ovat yksinkertaisella ja tunnetulla tavalla yhteydessä neliömassajakaumaan /24/. Kaupallisissa formaatiomittareissa käytetään kuitenkin usein laitekohtaisia tunnuslukuja, jotka eivät välttämättä ole suorassa yhteydessä neliömassajakaumaan. Tällaisten tunnuslukujen vertailu keskenään on vaikeaa, minkä vuoksi yleinen käytäntö on ilmoittaa miten ja millä laitteella tulos on saatu. Kannattaa myös huomioda, että joillakin laitteilla suuri mittaustuloksen lukuarvo kuvaa hyvää formaatiota ja joillakin laitteilla huonoa formaatiota.

3.4 Formaation mittaaminen

3.4.1 Suorat ja epäsuorat mittaamenetelmät

Formaation mittaamiseen käytetyt menetelmät voidaan jakaa suoriin ja epäsuoriin menetelmiin sen mukaan, miten ne suhtautuvat formaation määritelmään /22, 23, 24, 35/. Formaatiota mitattaessa mitataan neliömassaa, jota voidaan mitata suoraan samalla tavalla kuin mitä tahansa muutakin massaa eli punnitsemalla. Pienen mittakaaavan vuoksi tämä ei kuitenkaan ole tarkoituksenmukaista, joten usein turvaudutaan epäsuoriin mittaamenetelmiin, kuten valon tai ionisoivan säteilyn läpäisyn eli transmittanssin mittaamiseen.

Epäsuorat mittaamenetelmät perustuvat siihen oletukseen, että neliömassan ja transmittanssin välillä vallitsee yksikäsitteinen yhteys /24, 27, 35/. Tämä oletus pitää varsin hyvin paikkansa ionisoivan säteilyn osalta, mutta näkyvän valon kohdalla tämä yhteys ei ole yksikäsitteinen. Epäsuoria menetelmiä käytettäessä on tärkeää huomioda myös mittaussaukon koon vaikutus. Sen tulisi olla välillä 0,1-1,0 mm /27/. Tällä alueella saavutetaan vielä kohtuullinen erotuskyky mutta pienemmillä mittaussaukoilla virheherkkyys kasvaa ja mittausta muuttuu työlääksi.

Yleisesti käytettyjen formaation mittaamenetelmien tyypilliset piirteet ja tavallisimmat käyttötarkoitukset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Formaation mittaamenetelmien luonteenomaiset piirteet ja niille parhaiten soveltuvat käyttöalueet /23/.

Mittausmenetelmä	Mittasignaali	Nopeus	Käytön helppous	Tarkkuus	Sovellusalue	Tunnusluvut
Punnitseminen	pistejoukko	- -	- -	0	-	-
Näkyvä valo *	jatkuva	+ +	+ +	- -	on-line -mittaus	intensiteetti
Suora β -säteilyn mitta	pistejoukko	+	+	+ +	laaduntarkkailu, tutkimus- ja kehitystyö	intensiteetti
Radiografia	kaksiulotteinen kuva	- -	-	+	tutkimus- ja kehitystyö	intensiteetti, mittaskaala

*) Kalibroimaton mitta

3.4.2 Punnitus

Formaatio voidaan periaatteessa mitata punnitsemalla paperista leikattuja pieniä paloja /22, 24, 35/. Punnitustuloksista ja näytekappaleiden pinta-aloista voidaan laskea neliömassa-arvojen keskihajonta. Tarkkaan lopputulokseen pääseminen on kuitenkin äärimmäisen vaikeaa, sillä esimerkiksi halkaisijaltaan 1 mm kokoisten kappaleiden leikkaamisessa tehty 20 μ m leikkausvirhe aiheuttaa 4 % virheen pinta-alaan ja samalla punnitustulokseen /23/. Tämä mittaussvirhe on helposti samaa suuruusluokkaa kuin itse neliömassavaihtelu. Myös näytteiden käsittely muodostuu ylivoimaisen vaikeaksi. Menetelmän hankaluuden ja epätarkkuuden vuoksi punnitsemista ei juurikaan käytetä käytännön mittauksissa.

3.4.3 Näkyvä valo

Optisessa formaatiomittauksessa mitataan paperin läpäisseen valon intensiteetin paikallista vaihtelua /23/. Valon transmittanssin T riippuvuutta eri tekijöistä kuvaa yhtälö

$$T = T(m(\vec{x}), s(\vec{x}), k(\vec{x})), \quad (9)$$

missä

$m(\vec{x})$ on neliömassa,
 $s(\vec{x})$ on valonsirontakerroin,
 $k(\vec{x})$ on valonabsorptiokerroin ja
 \vec{x} on paikkavektori.

Mittaustulos ei siten ole riippuvainen vain neliömassajakaumasta vaan myös paperin optisista ominaisuuksista ja niiden jakaumasta.

Voidaankin todeta, että optisen mittauksen antama tulos riippuu voimakkaasti arkin massakoostumuksesta, valmistusprosessista ja arkin paksuuden vaihteluista /24, 35, 38/. Käytännössä paras yhteys saavutetaan ilman täyteainetta valmistetuilla, päällystämättömillä sellu- tai hiokepapereilla. Optisen mittauksen kannalta ongelmallisimpia paperilajeja ovat erikoispaperit kuten glassiini ja irrokepaperi sekä runsaasti täyteainetta sisältävät paperit kuten SC-paperi. Myös päällystetyn paperin formaation mittaaminen optisesti on erittäin vaikeaa. Päällysteen optiset ominaisuudet poikkeavat merkittävästi pohjapaperin ominaisuuksista ja etenkin teräpäällystyksessä päällystämäärän vaihtelu kompensoi pohjapaperin pinnanmuotojen vaihtelua /39/.

Erilaisista prosessitekijöistä voimakkaimmin neliömassan ja valon transmittanssin väliseen yhteyteen vaikuttaa kalanterointi /24, 35, 38/. Kun arkkiä kalanteroidaan, arkin paksuimpiin kohtiin kohdistuu suurempi kuorma kuin ohuisiin kohtiin. Tämän vuoksi paksujen kohtien valonläpäisykyky kasvaa voimakkaasti ja arkkiin syntyy neliömassavaihtelusta riippumatonta transmittanssvaihtelua. Märkäpuristus ja jauhatus lisäävät puolestaan kuitujen välisten sidosten määrää ja kasvattavat transmittanssin arvoa.

Oleellinen vaikutus saatuihin tuloksiin on myös mitattavan arkin raaka-ainekoostumuksella, kuten kuitulajilla ja täyteaineella /24, 35/. Lisättäessä massan hienoaineen määrää arkin transmittanssi alenee. Paperin värjääminen ja sävyttäminen kasvattavat puolestaan absorptiokerrointa.

Arkin optisten ominaisuuksien vaihtelun vaikutusta mittaustulokseen voidaan vähentää tarkoituksenmukaisella kalibroinnilla /23, 35, 38/. Mittarien kalibrointi siten, että transmittanssi- ja neliömassavaihteluiden välinen yhteys on yksiselitteinen, on kuitenkin erittäin työlästä, sillä jokainen näyte täytyy kalibroida erikseen. Lisäksi useimmista optisista mittareista puuttuu tällainen kalibrointimahdollisuus kokonaan. Sen sijaan mittarit on usein valmiiksi kalibroitu siten, että ne korreloivat näytteen antaman visuaalisen vaikutelman, paperin pohjan, kanssa /24, 29, 38/.

Optisen mittarin antama tulos riippuu voimakkaasti myös mittauslaitteen ilmaisimen ja valonlähteen spektraalisista ominaisuuksista ja mittausgeometriasta /24, 38/. Mono-

kromaattisen valon (laserin) käyttöön perustuva mittalaite on herkkä esimerkiksi näytteen värinvaihteluille.

Optisilla formaatiomittareilla on myös tiettyjä merkittäviä etuja /20, 23, 24, 35/. Mittaus on hyvin nopea suorittaa ja näyte säilyy koskemattomana. Mittarit ovat myös kestäviä ja yksinkertaisia eikä niiden käyttöön liity säteilyvaaraa. Puutteistaan huolimatta optiset formaatiomittarit soveltuvat hyvin käytettäväksi on-line -sovelluksina yksittäisen paperikoneen ohjaamiseen ja formaation optimoimiseen, kunhan vältetään eri aikoina tuotettujen paperien ja eri paperilajien keskinäistä vertailua. On-line -mittaus on usein toteutettu siten, että formaatio mitataan ennen paperin kalanterointia yhdestä kohdasta poikkirataa. Näin saadusta jatkuvasta signaalista voidaan laskea erilaisia tunnuslukuja formaatiolle.

Yleisimmin käytettyjä optisia off-line -formaatiomittareita ovat NUI- ja M/K Systems -mittarit /12, 20, 28/. NUI (Non Uniformity Index) -mittari analysoi pyörivän näytteen läpi transmittoitunutta valoa. Tulos ilmoitetaan kokonaisvaihtelun määränä, joten pienempi tulos kuvaa tasaisempaa formaatiota. M/K Systems -mittari mittaa puolestaan näytteen läpi transmittoituneen valon amplitudijakauman korkeutta, joten suurempi lukuarvo kuvaa tasaisempaa formaatiota. Myös Metso Automationin valmistama formaatiomittari käyttää amplitudijakauman korkeutta formaation mittana.

3.4.4 β -säteily

Formaation mittaaminen epäsuoralla menetelmällä edellyttää mittaukseen käytetyn säteilyn transmittanssin ja neliöpainon välisen yhteyden tuntemista, ja tämän yhteyden yksikäsitteisyyttä /24, 35/. Näkyvä valo ei täytä yksikäsitteisyyden vaatimusta, joten se ei sovellu tarkkojen mittausten tekemiseen. Läpäisykykynsä puolesta erilaisista ionisoivan säteilyn lajeista parhaiten paperin ja kartongin formaation mittaukseen soveltuu β -säteily. β -säteilyn absorptiokerroin on lähes vakio kaikille alkuaineille, joten säteilyn vaimeneminen on samanlaista kaikissa paperinvalmistuksen raaka-aineissa. Tällöin paperin koostumuksessa esiintyvä vaihtelu ei häiritse mittausta ja yksikäsitteisyyden vaatimus voidaan toteuttaa.

β -säteilyn läpäistessä paperiarkin kohdasta, jonka neliömassa on $m(\vec{x})$, on paperin läpäisseen säteilyn intensiteetti $I(\vec{x})$ Lambert-Beerin lain mukaan [10, 24, 35]

$$I(\vec{x}) = I_0 e^{-\alpha \cdot m(\vec{x})}, \quad (10)$$

missä I_0 on säteilyn alkuperäinen intensiteetti ja α on massa-absorptiokerroin. Tämän kaavan avulla voidaan laskea neliömassa näytteen eri pisteissä paperin läpäisseen säteilyn intensiteetin mittaustuloksista.

Formaation mittauksessa käytettävän säteilylähteen tulee olla puhdas β -säteilijä ja sen lähettämän säteilyn massa-absorptiokertoimen tulee olla mitattavalle näytteelle sopivalla alueella [10]. Parhaan erotuskyvyn tietyllä näytteen keskimääräisellä neliömassalla m antava massa-absorptiokertoimen α arvo saadaan johdettua kaavasta 10 derivoimalla eli

$$\alpha = \frac{1}{m}. \quad (11)$$

Formaation mittaukseen puhtauden ja säteilyn massa-absorptiokertoimen puolesta soveltuvia isotooppeja ovat paperille hiili-14 ($\alpha = 0,025 \text{ m}^2/\text{g}$) ja prometium-147 ($\alpha = 0,014 \text{ m}^2/\text{g}$) sekä kartongille krypton-85 ($\alpha = 0,003 \text{ m}^2/\text{g}$) [10]. Näiden isotooppien massa-absorptiokertoimia vastaavat, tarkimman erotuskyvyn antavat neliömassat ovat 40, 70 ja 360 g/m^2 . Erotuskyvyn tarkkuus on kuitenkin hyvä varsin laajalla neliömassa-alueella, joten edellä mainitut säteilylähteet soveltuvat hyvinkin eripainoisten paperi- ja kartonkinäytteiden formaation mittaamiseen.

β -säteilyllä tapahtuva formaation mittaus voidaan jakaa suoraan ja epäsuoraan menetelmään (radiografia). Suorassa menetelmässä β -säteilysuihku, jonka halkaisija tavallisesti on 1 mm, ohjataan kohtisuoraan paperin läpi ja paperin läpäissyt säteily mitataan paperin toiselta puolelta [10, 24, 35]. Mittauksia toistetaan eri kohdista paperia, kunnes pisteitä on mitattu niin monta, että neliömassahajonta voidaan määrittää tarkasti. Jokaisessa pisteessä on mittausajan oltava niin pitkä, että β -säteilyn stokastisuudesta johtuva pulssivuon hajonta on riittävän pieni.

Suoraan β -säteilyn mittaukseen perustuvista mittalaitteista yleisimmin käytetty on Ambertecin Beta Formation Tester. Laitteella voidaan 3 minuutin aikana mitata 400 kpl

pisteitä alueelta, jonka koko on 70 mm x 70 mm /40/. Säteilylähteenä laitteessa käytetään prometium-147 -isotooppia, jonka aktiivisuus on 190 MBq. Laite soveltuu sellaisten papereiden ja kartonkien formaation mittaukseen, joiden neliömassa on välillä 20-350 g/m².

3.4.5 Radiografia

Radiografia-menetelmässä paperin neliömassavaihtelu muunnetaan valon transmitanssivaihteluksi /10, 12, 24, 35/. Tavallisesti menetelmä perustuu epäsuoraan β -säteilymittaukseen, mutta säteilylähteenä voidaan käyttää myös röntgenputkea tai elektronitykkiä. β -radiografia perustuu levymäisen säteilylähteen ja röntgenfilmin käyttöön. Mitattava näyte asetetaan säteilylähteen ja röntgenfilmin väliin, jolloin neliömassavaihtelusta muodostuu kaksikulotteinen kuva filmille. Kehittämisen jälkeen röntgenfilmin transmitanssivaihtelu määritetään optisesti kuva-analysaattorin avulla. Uusimmissa sovelluksissa röntgenfilmi on korvattu tallentavalla fosforiudulla /41, 42/. Uusi menetelmä on nopeampi, yksinkertaisempi ja sen toistettavuus on parempi. Filmiä ei kulu, sitä ei tarvitse kehittää eikä syntyvää kuvaa tarvitse lukea kuvanlukijalla.

Radiografian suurimpana etuna suoraan β -säteilymittaukseen verrattuna on erittäin pieni mittausaukko, mikä mahdollistaa korkean erotustarkkuuden saavuttamisen ja siten monimutkaisten formaation tunnuslukujen määrittämisen /10, 12, 24, 35/. Menetelmän haittapuolina ovat hitaus ja rajoitettu soveltuvuus raskaammille papereille. Radiogrammin valotus röntgenfilmille ja filmin kehittäminen kestää tyypillisesti tunnista jopa kymmeneen tuntiin valotusajan riippuessa eksponentiaalisesti näytteen neliömassasta. Myöskään hiili-14 -isotooppi ei sovellu säteilylähteeksi neliömassaltaan yli 100 g/m² oleville papereille isotoopin lähettämän säteilyn suuren massaabsorptiokertoimen vuoksi.

STFI-Formation on yleisesti tunnettu radiografialaitteisto /12/, joka perustuu β -säteilyn (säteilylähteenä hiili-14 -isotooppi) ja röntgenfilmin käyttöön. Yhden, kooltaan 130 mm x 180 mm ja neliömassaltaan korkeintaan 100 g/m² olevan näytteen valottaminen kestää noin 30 minuuttia. Kehittämisen jälkeen röntgenfilmi analysoidaan optisella kuvanlukijalla, jonka mittausaukon halkaisija on 0,1 mm. Laitteistolla voidaan määrittää mitattavan näytteen tehospektri ja sen avulla kaikki muut formaatiota kuvaavat tunnusluvut.

4 RAINANMUODOSTUS

4.1 Rainanmuodostuksen teoria

Rainanmuodostus on paperinvalmistuksen osaprosessi, joka alkaa sakeamassan laimennuksesta ja päättyy viiraosalla tapahtuvaan vedenpoistoon /20/. Sopivasti valitut ja käsitellyt raaka-ainekomponentit sekoitetaan massasuspensioksi, joka levitetään perälaatikon avulla homogeeniseksi massarainaksi ja lujitetaan poistamalla siitä vettä viirakankaan läpi suotauttamalla. Veden tehtävänä on toimia raaka-aineseoksen kuljettajana ja mahdollistaa komponenttien homogeeninen jakautuminen seokseen.

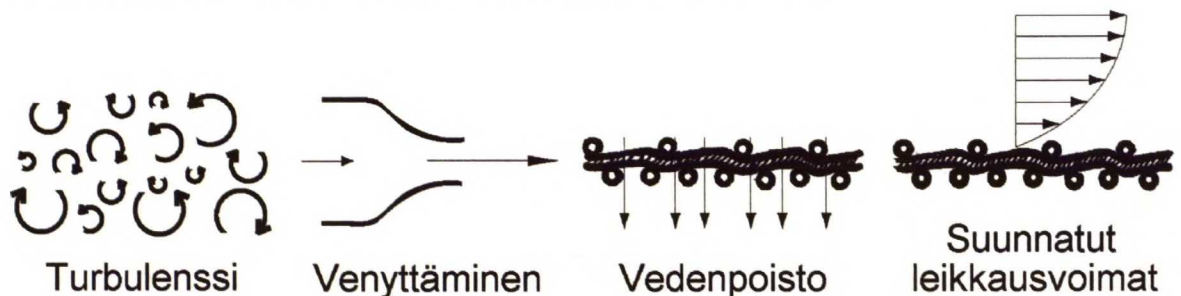
Tasoviirakone on paperikoneen perinteinen malli, joka on alunperin kehitetty jo yli 150 vuotta sitten /20/. Nykyisillä tasoviirakoneilla ei tosin ole enää paljoakaan yhteistä perinteisten tasoviirakoneiden kanssa. Alkuperäisestä, painovoimaan perustuneesta vedenpoistosta on siirrytty nykyiseen, viiraosalla sijaitsevia vedenpoistoelimiä hyödyntävään vedenpoistoon. Samalla on tullut mahdolliseksi hallita vedenpoiston määrää ja kuitujen flokkaantumistilaa. Tasoviirakoneet soveltuvat hyvin käytettäviksi erikoispaperien ja kartonkien valmistukseen, missä nopeusvaatimukset eivät ole kovin suuria. Tasoviirakoneen etuna voidaan tietyissä käyttötarkoituksissa nähdä yksisuuntainen, rauhallinen ja pitkäkestoinen vedenpoisto.

Nopeissa painopaperikoneissa ei sen sijaan enää juurikaan käytetä tasoviiroja, vaan ne on korvattu hybridi- ja kitaformereilla. Tähän kehitykseen on vaikuttanut nopeuksien kasvu ja kiristyneet laatuvaatimukset. Nopeuden kasvaessa kasvaa samalla myös nestepinnan ja ilman välinen kitka, mikä aiheuttaa lopulta massasuspension joutumisen epästabiiliin tilaan /20, 43/. Laadun kannalta tasoviiraosalla ei voida helposti aikaansaada riittävän voimakkaita flokkeja hajottavia leikkausvoimia /43/. Tämä voi johtaa rainan sulkeutumiseen eli voimakkaasti kokoonpuristuneen, vedenpoistoa estävän tiiviin kuitukerroksen muodostumiseen viiralle. Riittävän suuret leikkausvoimkentät ovat keskeisiä myös hyvän formaation saavuttamiseksi.

Rainanmuodostus on pääasiassa hydrodynaaminen prosessi, jonka tarkastelu rajoittuu lähinnä massasuspension komponentteihin vaikuttaviin hydrodynaamisiin voimiin /44/. Yksittäiset kuidut voivat olla joko suhteellisen vapaita liikkumaan suhteessa toisiinsa tai ne voivat olla enemmän tai vähemmän toisiinsa kytkeytyneitä. Hydrody-

naamisten voimien hallitulla käytöllä pyritään pitämään massasuspensio homogeenisena eli hajottamaan kuitujen muodostamia verkostoja, flokkeja.

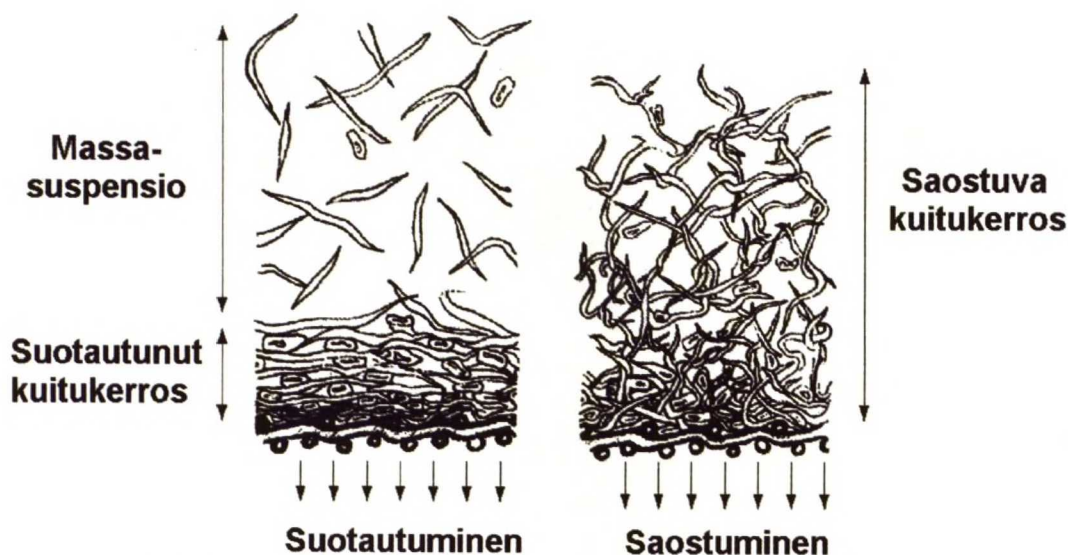
Parkerin /44/ mukaan rainanmuodostuksessa vaikuttaa kolme hydrodynaamista prosessia: vedenpoisto, suunnatut leikkausvoimat ja turbulenssi. Nordström /45/ lisää näihin vielä yhden prosessin, venyttämisen, joka perustuu massasuspension nopeuden kiihtymiseen perälaatikon huulikanavassa. Kiihtyvyyden aiheuttaman voiman johdosta flokit venyvät ja voivat hajota. Massasuspensioon vaikuttavia hydrodynaamisia prosesseja voidaan siten tunnistaa neljä kappaletta (kuva 5).



Kuva 5. Rainanmuodostuksessa vaikuttavat hydrodynaamiset prosessit /20/.

Massasuspension komponenttien välillä vaikuttavat kolloidiset ja kemialliset voimat ovat tavallisesti niin pieniä, ettei niitä huomioida rainanmuodostusta tarkasteltaessa /44/. Rainanmuodostuksessa käytettävät laitteet onkin suunniteltu vain hydrodynaamisten voimien hallittua käyttöä ajatellen.

Suotautumattoman massasuspension virtaustilasta riippuu, tapahtuuko rainanmuodostus suotautumalla vai saostumalla /44/. Suotautumista tapahtuu silloin, kun kuidut voivat liikkua toistensa suhteen massasuspensiossa. Tällöin jo muodostuneen rainan ja suspension välillä on selvä raja eikä suspension sakeus juurikaan muutu. Saostumista tapahtuu puolestaan silloin, kun kuidut eivät pääse liikkumaan suhteessa toisiinsa tai silloin, kun jo muodostunut raina hajoaa ja muodostuu uudelleen esimerkiksi suurten leikkausvoimien johdosta. Saostumalla muodostuvan rainan neliömassajakauma jää epätasaiseksi. Muodostuneen rainan ja suspension välillä ei esiinny selvää rajaa, vaan kuitupitoisuus kasvaa tasaisesti siirryttäessä suspension pinnalta viiran pinnalle. Suotautumisen ja saostumisen mekanismit on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Rainanmuodostus suotautumalla ja saostumalla /44/.

Käytännön paperinvalmistuksessa rainanmuodostus tapahtuu sekä suotautumalla että saostumalla /44/. Suotautuminen on kuitenkin vallitseva mekanismi, sitä enemmän mitä alhaisemmassa sakeudessa rainanmuodostus tapahtuu. Suotautumiseen liittyy keskeisenä myös itsetasoittuvuuden (self-healing) käsite /20/. Tällä tarkoitetaan neliömassajakauman tasoittumista suotautumisen vaikutuksesta. Rainasta poistuva vesi pyrkii aina kulkemaan sellaista reittiä, jossa virtausvastus on pieni eli kohdist, joihin on suotautunut vähemmän kuituja kuin ympäröiviin kohtiin keskimäärin. Tällöin näihin ohuempiin kohtiin kerrostuu enemmän kuituja ja neliömassavaihtelu pienenee. Saatamalla massasuspension flokkisuustila sopivaksi laimentamalla tai hydrodynaamisten voimien avulla voidaan tätä tasoittumista edelleen voimistaa.

4.2 Flokit ja flokkaantuminen

4.2.1 Kuituverkostojen muodostuminen

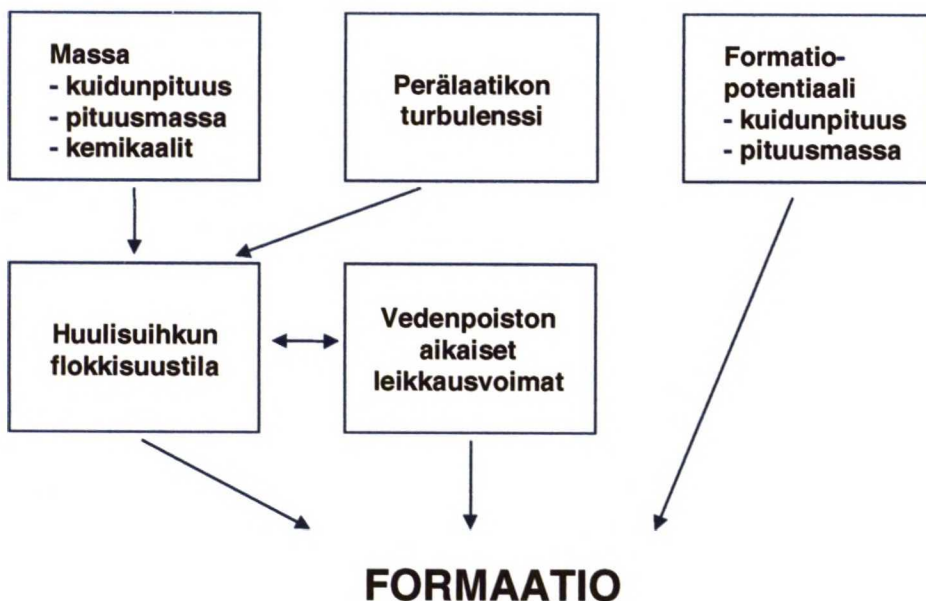
Kuitujen flokkaantumisella tarkoitetaan massasuspensiossa tapahtuvaa kuituverkoston syntymistä. Flokit ovat puolestaan hiutalemaisia kuituverkostoja. Puukuidut ovat niin suuria, etteivät kolloidiset voimat kykene pitämään niitä yhdessä vesiliitteessä /44/. Sen sijaan verkostonmuodostus tapahtuu mekaanisesti kitkavoimien vaikutuksesta. Kuidut taipuvat, kiertyvät ja kietoutuvat toisiinsa massasuspensiossa hydrodynaamisten voimien vaikutuksesta. Näiden voimien vaikutuksen vähentyessä kuidut pyrkivät suoristumaan. Tällöin ne painautuvat naapurikuituja vastaan ja jäävät taivu-

tusjännityksen alaisiksi. Taivutusjännitys kohdistaa kuitu-kuitu -rajapintaan normaali-voiman, joka aiheuttaa kitkavoiman kuitujen välille. Näin syntyy kuitujen muodostama verkosto, joka käyttäytyy kuin yhtenäinen, tietyn lujuuden omaava kappale. Yhtenäisen verkoston syntyymiseen tarvitaan niin paljon kuituja, että jokaisella kuidulla voi olla vähintään kolme kosketuskohtaa naapurikuituihin. Mitä pidempi kuitu on, sitä todennäköisemmin sillä on vähintään kolme kosketuskohtaa naapurikuitujensa kanssa. Pitkien kuitujen taipumus muodostaa kuituverkostoja on siis suurempi kuin lyhyillä kuiduilla.

Kuituverkoston olemassaolo vaikuttaa massasuspension materiaali jakauman tasaisuuteen, joka puolestaan vaikuttaa suoraan suotautettavan rainan rakenteeseen /44/. Massasuspensiossa esiintyvien flokkien koon tiedetään riippuvan suspension sakeudesta sekä hydrodynaamisten voimien mittakaavasta ja voimakkuudesta. Mitä pienempimittakaavaisia ja voimakkaampia nämä voimat ovat, sitä tasaisemmin kuidut jakautuvat ja sitä pienempiä muodostuvat flokit ovat. Hydrodynaamisten voimien tehtävänä ei ole ainoastaan ylläpitää tasaista kuitujen jakaumaa massasuspensiossa vaan myös hajottaa jo muodostuneita kuituverkostoja.

4.2.2 Massan formaatiopotentiaali

Massan formaatiopotentiaalilla tarkoitetaan massasta tehdyn standardilaboratorioarkin formaatiota /46/. Kuitujen pituudella ja niiden pituusmassalla on todettu olevan hyvin selvä vaikutus massan formaatiopotentiaaliin. Lyhyillä ja pienen pituusmassan omaavilla kuiduilla saavutettava formaatio on selvästi paras. Formaatioon vaikuttavat rainanmuodostusmekanismit on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Formaatioon vaikuttavat mekanismit rainanmuodostuksessa /46/.

Kerekes ja Schell /47/ ovat kehittäneet tunnusluvun, joka kuvaa hyvin massan flokkautumistaipumusta. Miehitysluku (crowding factor, n_{crowd}) kertoo, kuinka monta kuitua on sellaisen pallon sisällä, jonka halkaisija on keskimääräinen kuidunpituus. Miehitysluku n_{crowd} (kpl) voidaan laskea yhtälöstä

$$n_{crowd} = \frac{\pi \cdot c \cdot L^2}{6 \cdot \omega} \quad (12)$$

missä

n_{crowd} on kuitujen lukumäärä sellaisen pallon sisällä, jonka halkaisija on L (kpl),
 c on massan kuitusakeus (kg/m^3),
 L on pituuspainotettu kuidunpituus (m) ja
 ω on pituusmassa (kg/m).

Korkean miehitysluvun massasuspensiossa kuidut ovat jatkuvassa kontaktissa toistensa kanssa muodostaen flokkeja /47/. Tämä tapahtuu miehitysluvun ylittäessä raja-arvon 60. Kahden millimetrin pituisten kuitujen, joiden pituusmassa on $0,2 \text{ mg/m}$ (mäntysulfaattimassa), muodostama suspensio saavuttaa tämän raja-arvon $0,5 \text{ ‰}$:n sakeudessa /36/. Taulukossa 4 on esitetty massasuspension kolmen erilaisen sakeustilan väliset raja-arvot ja näissä tiloissa esiintyvät kuitujen väliset kontaktit.

Taulukko 4. Massasuspensiossa olevien kuitujen väliset kontaktit /47/.

Massasuspension tila	Kuitujen väliset kontaktit	n_{crowd}
Laimea	Satunnaisia kontakteja	$n_{crowd} \leq 1$
Keskisakea	Pakotettuja kontakteja	$1 < n_{crowd} < 60$
Sakea	Jatkuva kontakti	$n_{crowd} \geq 60$

Miehitysluvun on todettu korreloivan hyvin massan flokkaantumistaipumuksen lisäksi myös paperin formaation kanssa /48/. Normeeratun neliömassahajonnan ja miehitysluvun yhtälöiden (yhtälöt 3 ja 12) sekä kokeellisen aineiston avulla Kiviranta ja Dodson /46, 48/ ovat johtaneet paperin normeeratulle neliömassahajonnalle n empiirisen kaavan

$$n = (0,15 + 0,66\sqrt{L\omega}) \sqrt{e^{0,47 + 0,125 \frac{cL^2}{\omega}}} \quad (13)$$

missä

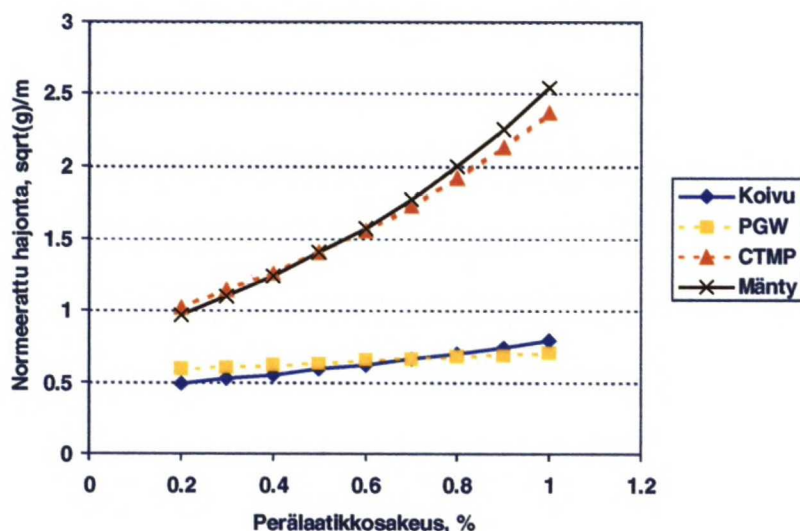
c on massan kuitusakeus (%),
 L on pituuspainotettu kuidunpituus (mm) ja
 ω on pituusmassa (mg/m).

Kaavalla 13 voidaan siis laskea tasoviirakoneella saavutettava formaatio, kun tiedetään perälaatikkosakeus, pituuspainotettu kuidunpituus sekä pituusmassa. Taulukkoon 5 on kerätty miehitysluvun ja formaation laskemista varten tarvittavat tiedot tavallisimmista kartongin ja hienopaperin valmistukseen käytetyistä massalajeista. Lyhyt- ja pitkäkuituista massaa sisältävien massasuspensioiden laskennallinen formaatio ja miehitysluku voidaan määrittää näiden massojen pituuspainotettuja pituuskeskiarvoja käyttäen /49/. Käytännön paperinvalmistusta simuloitaessa on otettava huomioon vielä retentio, massan täyteaine- ja hienoainepitoisuus, mahdollinen hybridi- tai kitformereri, rainan monikerrosrakenne, mahdollinen toisioperälaatikko ja päällystys /46/. Formerilla varustetulla tasoviirakoneella laskennallisen formaation arvo tulee kertoa 0,7:llä oikean tuloksen saamiseksi.

Taulukko 5. Tavallisimpien paperinvalmistuksessa käytettävien massalajien pituuspainotetut kuidunpituudet ja pituusmassat /46, 49, 50/.

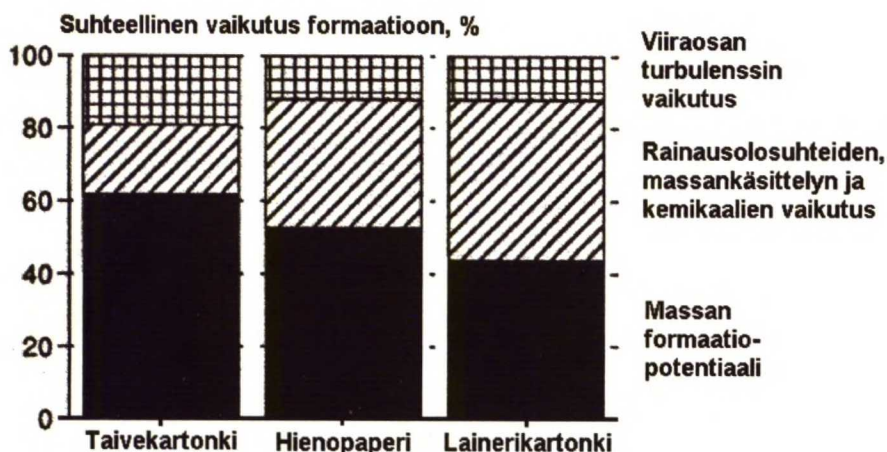
Massalaji	Pituuspainotettu kuidunpituus L (mm)	Pituusmassa ω (mg/m)
Haapasulfaatti	0,83	0,11
Kuusihioke	1,00	0,26
Koivusulfaatti	1,01	0,11
Mäntysulfaatti	2,15	0,28

Kaavan 13 toimivuutta on tutkittu 33:lla hyvin erilaisella paperi- ja kartonkikoneella. Lasketun formaation ja mitatun formaation väliseksi korrelaatiokertoimeksi on saatu 0,86 /46/. Kuvassa 8 on esitetty neljälle erilaiselle massatyypille kaavalla 13 lasketut normeeratun neliömassahajonnan arvot perälaatikkosakeuden funktiona.



Kuva 8. Formaatio perälaatikkosakeuden funktiona neljälle massatyypille /46/.

Kiviranta on väitöskirjassaan /51/ tutkinut eri tekijöiden vaikutusta formaatioon (kuva 9). Massan formaatiopotentiaalin suhteellisen osuuden voidaan havaita vaihtelevan rainausolosuhteiden mukaan. Mitä pienempi massan miehitysluku on perälaatikossa, sitä suurempi on formaatiopotentiaalin suhteellinen osuus paperin formaatiosta. Miehitysluvun kasvaessa rainanmuodostusprosessin vaikutus formaatioon korostuu. Viirapöydän turbulenssin (massapinnan värähtelyn) vaikutus formaatioon on varsin pieni.

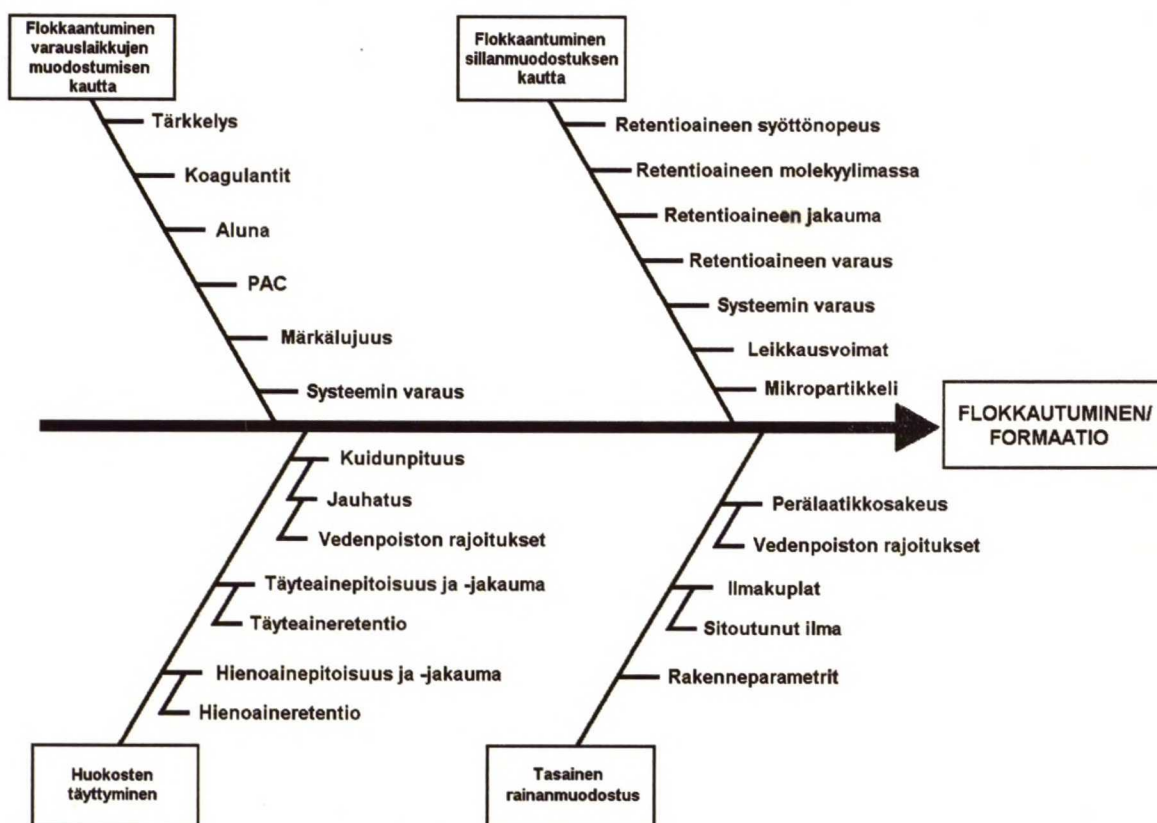


Kuva 9. Formaatioon vaikuttavien tekijöiden suhteelliset vaikutukset /51/. Perälaatikon sakeudet ovat vasemmalta lukien 0,71 %, 0,76 % ja 0,40 % ja miehitysluvut vastaavasti 16, 27 ja 32.

Yhteenvetona voidaan todeta, että kuidunpituus on tärkein flokkaantumiseen ja siten formaatioon vaikuttava kuituominaisuus /49, 52/. Kuidunpituus vaikuttaa yhdessä pitiuusmassan kanssa keskeisesti massajakauman tasaisuuteen kuitujen välisten kontaktien määrän, flokkikokoon ja kuitujen liikkuvuuden kautta.

4.2.3 Muut flokkaantumiseen vaikuttavat tekijät

Jokinen /52/ on tutki väitöskirjassaan paperimassakuitujen flokkaantumistaipumusta. Saamiensa tulosten perusteella hän on esittänyt, että flokkaantumiseen vaikuttavista tekijöistä mekaaniset tekijät ovat tärkeämpiä kuin kemialliset. Erityisten deflokkaus-kemikaalien käytöllä pystyttiin flokkaantumista vähentämään jonkin verran, mutta re-tentioaineiden vaikutus flokkaantumiseen oli vähäistä. Kuvassa 10 on esitetty Free-manin /53/ käsitys flokkautumiseen ja formaatioon vaikuttavista kemiallisista tekijöistä.



Kuva 10. Formaatioon vaikuttavia kemiallisia tekijöitä /53/.

Formaatioon voidaan vaikuttaa myös jauhatuksella. Tällöin tulee jauhatustapa valita mahdollisimman katkovaksi /46, 50/. Pelkkä jauhatuksen määrän lisääminen ei tuo toivottua tulosta, sillä jauhatustasteen kasvaessa massan suotautumisvastus kasvaa ja perälaattikkosakeutta joudutaan nostamaan. Jauhatus vaikuttaa kuitenkin useisiin

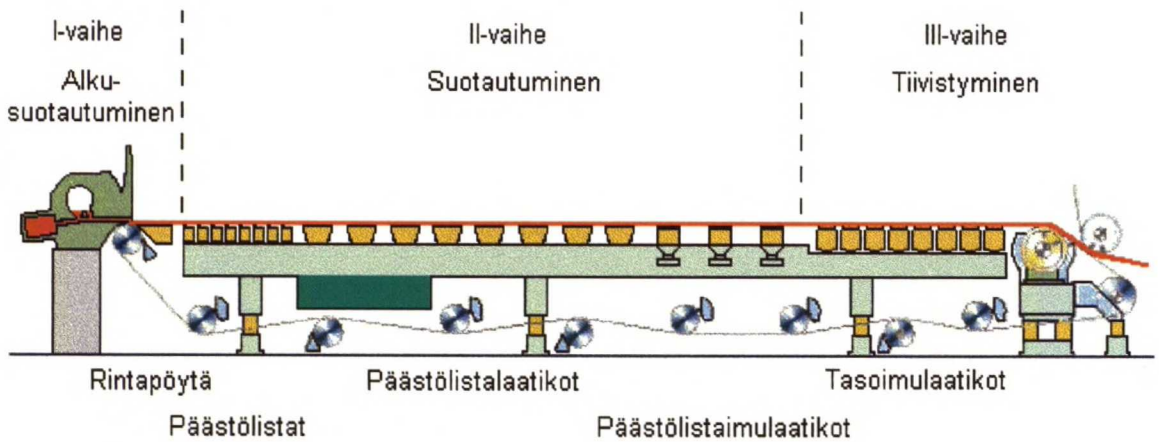
muihin paperin toiminnallisiin ominaisuuksiin voimakkaammin kuin formaatioon, joten jauhatuksen käyttö formaation parantamiseen ei yleensä johda hyvään lopputulokseen.

4.3 Rainanmuodostus tasoviirakoneella

Viiraosan tehtävänä paperinvalmistuksessa on poistaa perälaatikosta tulleesta massasuspensiosta vettä viirakankaan läpi suotauttamalla /54/. Vedenpoiston tulee olla hallittua ja rauhallista siten, että haluttu retentiotaso voidaan saavuttaa. Viiraosan tulee synnyttää muodostuvaan rainaan riittävän suuria hydrodynaamisia voimia flokkautumisen ehkäisemiseksi ja jo syntyneiden flokkien hajottamiseksi. Vedenpoiston viiraosalla tulee olla riittävän suurta, jotta rainan märkäluku saavuttaa riittävän tason ennen rainan siirtoa puristinosalle.

Tasoviiraosalla raina muodostetaan vaakatasossa liikkuvan viiran päälle /43, 54/. Viiran alla sijaitsevat rintapöytä ja erilaiset vedenpoistoelimet, jotka tukevat viiraa ja aikaansaavat samalla vedenpoistopaineen. Kuitususpensio tulee perälaatikosta viiralle 0,2-1,2 % sakeudessa ja valmis raina irrotetaan viiralta imutelan jälkeen tavallisesti yli 20 % kuiva-ainepitoisuudessa. Viiraosalla on siten poistettava yli 95 % suspension sisältämästä vedestä.

Tasoviiraosan vedenpoisto voidaan jakaa kolmeen alueeseen /54/ (kuva 11). Alkusuotautuminen tapahtuu huulisuihkun kohdatessa viiran rintapöydän kohdalla. Viirapöydän jälkeen seuraavilla päästölistoilla ja päästölistaimulaatikoilla vedenpoisto tapahtuu pääasiassa suotautumalla. Kohtaa, jossa veden kiilto häviää rainan pinnalta, nimitetään vesirajaksi. Vesirajan jälkeen eli yleensä tasoimulaatikoista alkaen vedenpoisto perustuu viiran yli vallitsevaan paine-eroon, joka saadaan aikaan alipainejärjestelmän avulla.



Kuva 11. Vedenpoisto tasoviiraosalla (/54/, lisätty vyöhykkeiden nimet).

Alkusuoatuminen perustuu painovoiman vaikutukseen ja huulisuihkun viiraa vastaan kohtisuoraan nopeuskomponenttiin /54/. Suotautumisvaiheessa painovoimalla ei ole enää merkitystä vaan vedenpoistopaine saadaan aikaan erilaisilla vedenpoistoelimillä. Suotautuminen tasoviiraosalla onkin aina jaksottaista, sillä vedenpoistopaine on merkittävä ainoastaan vedenpoistoelimien kohdalla. Niiden asettelulla ja valinnalla voidaan merkittävästi vaikuttaa vedenpoistoprofiiliin ja rainan z-suuntaiseen täyte- ja hienoainejakaumaan. Raina tiivistyy paine-eron vaikutuksesta, joka syntyy imettäessä ennen vesirajaa vettä ja vesirajan jälkeen ilmaa rainan läpi.

Vedenpoisto tasoviiralla voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen myös toisella tavalla /43/. Tällöin ensimmäinen vaihe on kestoaltaan hieman pidempi kuin edellä esitetyssä mallissa. Rainanmuodostus jatkuu 2,5 % kuiva-ainepitoisuuteen asti. Tämän jälkeen seuraa vedenpoistovaihe 10 % ja lopulta kuivumisvaihe 18 % kuiva-ainepitoisuuteen asti.

4.3.1 Lyhyt kierto

Lyhyen kierron tehtävänä on laimentaa konesäiliöstä tuleva massa perälaatikkosakeuteen viiraveden avulla /55, 56/. Lyhyessä kierrossa massasuspensiosta poistetaan kuplamainen ilma ja osa liuenneesta ilmasta. Epäpuhtauksia poistetaan sihtien ja pyörrepuhdistimien avulla. Tasaisen neliömassajakauaman saavuttamiseksi lyhyen kierron tulee vaimentaa paine- ja sakeusvaihteluita. Massasuspension virtaustilan ja siihen vaikuttavien hydrodynaamisten voimien tulee olla hallinnassa. Lyhyessä kierrossa massan joukkoon annostellaan ja sekoitetaan erilaisia kemikaaleja. Myös kuitujen ja täyteaineiden talteenotto kuuluu lyhyeen kierto.

Lyhyen kierron toiminta vaikuttaa voimakkaimmin formaatioon ilmanpoiston ja paine- ja sakeusvaihtelujen kautta. Massasuspensiossa esiintyvät ilmakuplat häiritsevät rainanmuodostusta ja johtavat rainaan jäädessään alhaisemman neliömassan omaavien alueiden syntyyn /53/. Syntyvän rainan neliömassahajonta kasvaa paine- ja sakeusvaihteluiden päästessä kulkeutumaan perälaatikkoon asti.

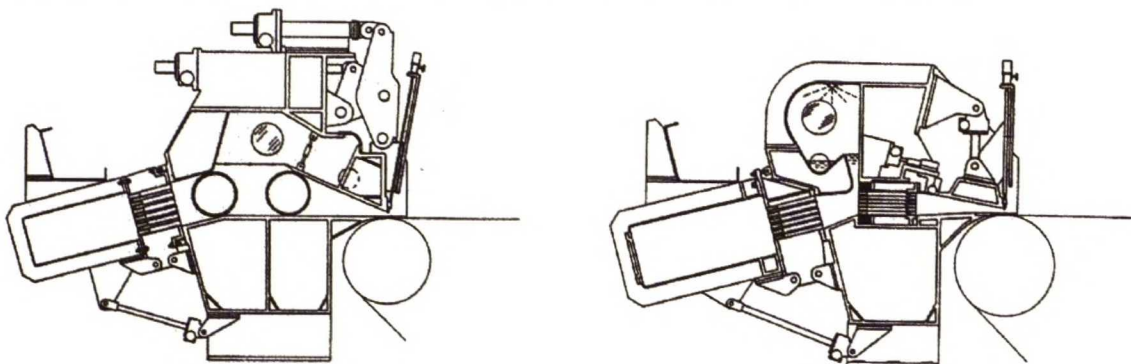
4.3.2 Perälaatikko

Lyhyen kierron jälkeen massasuspensio siirtyy perälaatikon syöttöputkistoon. Perälaatikon tehtävänä on levittää massasuspensio koko radan levyiseksi, homogeeniseksi huulisuihkuksi, jolla on haluttu sakeus, nopeus ja suunta /20, 57/. Perälaatikkotyypillä, sen mekaanisella rakenteella ja valmistustarkkuudella on tärkeä merkitys lopputuotteen laadun, poikkisuuntaisten profiilien ja perälaatikon puhtaanapysymisen kannalta. Perälaatikoille asetettavat keskeiset vaatimukset on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Perälaatikolle asetettavat vaatimukset /26/.

1.)	Perälaatikosta tulevan virtauksen tulee olla tasainen ja vakaa koko perälaatikon leveydeltä. Poikki- tai konesuuntaisia nopeusvaihteluja ei sallita.
2.)	Perälaatikon rakenteen tulee olla sellainen, etteivät lämpötilan ja paineen vaihtelut vaikuta huulen muotoon.
3.)	Kuitujen tulee olla hyvin dispergoituneina huulisuihkussa.
4.)	Poikkiprofiiliin, iskukulman, iskukohdan ja huulisuihkun nopeuden tulee olla hyvin ja helposti hallittavissa.
5.)	Perälaatikon tulee pysyä puhtaana.

Nykyään käytössä on kaksi erilaista perälaatikkoratkaisua, reikätelaperälaatikko (ilmatyynyperälaatikko) ja uudempi hydraulinen perälaatikko /20, 26/. Nykyaikaisen, kahdella reikätelalla varustetun reikätelaperälaatikon ja taso- ja hybridiviiraosalle sopivan hydraulisen perälaatikon tyypilliset rakenteet on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Reikätelaperälaatikko kahdella reikätelalla (vasemmalla) ja hydraulinen perälaatikko (oikealla) /26/.

Ilmatyynyperälaatikossa on tasauskammio, jossa vaikuttavan ylipaineen avulla aikaansaadaan huulisuihkulle tarvittava virtausnopeus. Ilmatyyny kykenee myös tasamaan massasuspension painevaihteluja. Ilmatyynyperälaatikkoa käytetään hitailla koneilla kartonkien ja erikoispapereiden valmistuksessa. Turbulenssi synnytetään pyörivillä reikäteloilla, minkä vuoksi ilmatyynyperälaatikkoa nimitetään tavallisesti reikätelaperälaatikoksi.

Reikätelojen käyttö turbulenssin muodostamiseen perustuu paineen alentumiseen ja sitä kautta syntyviin paikallisiin sivuttaisvirtauksiin /20/. Reikätelojen avulla aikaansaatu turbulenssi ei riipu virtausnopeudesta perälaatikossa, mikä mahdollistaa laajan neliömassa-alueen käytön. Turbulenssin mittakaava on kuitenkin suurempi ja intensiteetti alhaisempi kuin hydraulisella perälaatikolla.

Nykyisissä nopeissa paperi- ja kartonkikoneissa käytetään lähes poikkeuksetta hydraulisia perälaatikoita /20, 57, 58/. Painevaihteluita vaimennetaan hydraulisessa perälaatikossa tasauskammiolla tai erillisellä, ennen perälaatikkoa sijoitetulla ilmatyynyvaimentimella. Hydraulisessa perälaatikossa huulisuihkun flokkisuustilaa säädetään virtausturbulenssigeneraattorilla. Turbulenssigeneraattorissa luodaan virtaukseen kuristusten ja seinämäkitkojen avulla sopiva turbulenssitila.

Hydraulisella perälaatikolla on useita etuja, minkä vuoksi se on syrjäyttänyt reikätelaperälaatikon lähes täysin. Hydraulisen perälaatikon rakenne on mekaanisesti stabiili ja kompaktimpi /59/. Perälaatikon sisällä ei ole liikkuvia osia ja monet paperin ominaisuudet ovat parempia.

Taulukossa 7 on eritelty näiden kahden yleisimmin käytetyn perälaatikkotyypin rakenteesta ja ominaispiirteistä johtuvia hyviä ja huonoja puolia. Vertaamalla taulukossa 7 esitettyjä tietoja taulukossa 6 esitettyihin vaatimuksiin voidaan tehdä johtopäätöksiä perälaatikoiden suorituskyvystä ja soveltuvuudesta eri käyttötarkoituksiin.

Taulukko 7. Reikätelaperälaatikon ja hydraulisen perälaatikon edut ja haitat /26/.

Perälaatikkotyyppi	Edut	Haitat
Reikätelaperälaatikko	laaja virtausalue, erityisesti laajalla nopeusalueella toimivilla koneilla	huulisuihkun vanaisuus, erityisesti ajettaessa yli suunnitellun virtaaman
	ilmatyynyn ansiosta perälaatikko vaimentaa painepulsseja	huulisuihkun nopeusvaihtelut kone- ja poikkisuunnassa
	helppo pesu ja puhtaanapito	vanaisuuden haitatessa joudutaan tasapainottelemaan vanojen ja flokkisen rainan välillä
		turbulenssin voimakkuus ja aallonpituus eivät ole parhaalla mahdollisella alueella
Hydraulinen perälaatikko	hyvä neliömassaprofiili	hydraulinen perälaatikko ei vaimenna painepulsseja, vaimennukseen käytettävät ilmatyynyt auttavat
	hyvät rainan reunaosat	hitailla nopeuksilla ja alivirtaamilla likaantuminen
	parempi formaatio kuin reikätelaperälaatikolla, varsinkin nopeilla koneilla	hydraulinen perälaatikko vaatii tarkan mitoituksen eikä sovellu laajan virtausalueen vaativille koneille
	huopautuneempi paperin rakenne kuin reikätelaperälaatikolla, mistä seuraa parempi z-suuntainen lujuus, mikä on etuna erityisesti monikerroskartongin runkokerroksessa	pienet ryynimäiset flokit voivat aiheuttaa ongelmia

Massasulpun virtausnopeudella on keskeinen merkitys perälaatikon toiminnalle /26, 46, 59/. Perälaatikon virtausnopeus määräytyy viiran nopeudesta, paperin neliömassasta, perälaatikkosakeudesta, suihkun ja viiran nopeuserosta sekä retentiosta. Reikätelaperälaatikon suurimpia haittoja on vanaisuus, mikä johtuu huulitelan virtaukseen aiheuttamista nopeuseroista ajettaessa perälaatikkoa yli suunnitellun maksimivirtaaman. Hydraulinen perälaatikko on puolestaan mitoitettava reikätelaperälaatikkoa huomattavasti tarkemmin. Tyypillinen hyvän formaation antava virtausalue on 15 % suunnitellusta virtauksesta. Hydraulisen perälaatikon turbulenssigenaattori lakkaa kokonaan toimimasta tietyn virtausnopeuden alapuolella, minkä seurauksena rainan rakenne jää flokkiseksi. Yli suunnitellun virtaaman ajettaessa turbulenssi voi puolestaan kasvaa liiankin suureksi ja rainan rakenne muuttuu ryynimäiseksi.

Kiviranta /26/ tutki kokeellisesti hydraulisen ja reikätelaperälaatikon kykyä tuottaa hyvän formaation omaavaa taivekartongin runkokerrosta. Yleisesti ottaen reikätelaperälaatikolla saavutettiin pienempi neliömassahajonta kuin hydraulisella perälaatikolla. Reikätelaperälaatikon todettiin toimivan selvästi paremmin ali- kuin ylivirtaamalla. Reikätelaperälaatikolla saavutettiin selkeästi huonompi formaatio vasta kun virtaama on

reilusti alle mitoitusvirtaaman. Ajettaessa vakiosakeudella reikätelaperälaatikon sisäisen virtausnopeuden ei havaittu vaikuttavan formaatioon. Reikätelaperälaatikon tuotaman rainan flokkikoon havaittiin suurenevan, kun läpivirtaus pienenee.

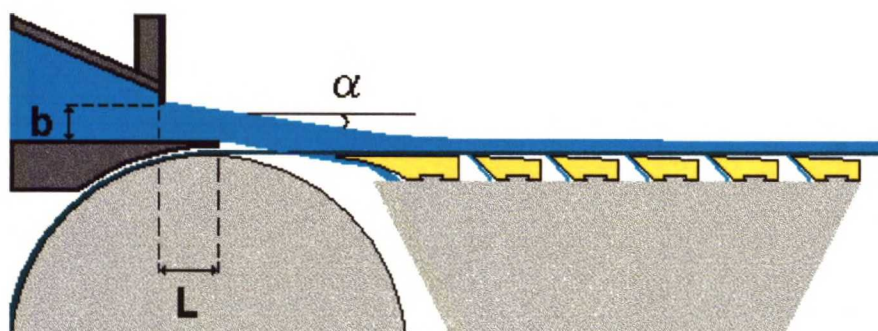
Nykyisin kaikkien formerityyppien uusissa perälaatikoissa käytetään neliömassaprofiilin säädössä laimennussäätöä entisen kärkilistasäädön tilalla /60/. Monikerroskartonkikoneilla on yleensä vain yksi laimennussäädetty perälaatikko, yleensä keskikerroksella. Laimennussäädöllä saavutetaan tarkempi säätövaste ja vältetään poikittaisvirtaukset.

Vesivanoiksi kutsutaan rainassa optisesti näkyviä vanoja, jotka eivät ole kuitenkaan neliömassaprofiilin vanoja /60/. Vesivanoja kutsutaan myös orientaatiovanoiksi tai ne voidaan tulkita hienoainevanoiksi. Vesivanoja esiintyy alhaisen turbulenssin perälaatikoissa (reikätelaperälaatikoissa) massoilla, jotka ovat pitkäkuituisia ja joita joudutaan ajamaan alhaisella perälaatikkosakeudella. Vesivanoja voidaan koettaa poistaa nostamalla perälaatikkosakeutta, kasvattamalla suihku/viira-nopeussuhdetta tai asentamalla perälaatikon alahuuleen turbulenssinestyrä.

4.3.3 Rintapöytä

Tavallisesti noin 25 % viiraosan vedenpoistosta tapahtuu rintapöydällä /43/. Tällöin myös noin 25 % rainasta muodostuu tässä vaiheessa. Rainan perusluonne määräytyykin varsin pitkälle alkusuotautumisen aikana. Tasaisen rainanmuodostuksen kannalta on keskeistä, että riittävän voimakkaat leikkausvoimat vaikuttavat rainaan rintapöydällä. Rainan sulkeutumisen riski on suuri, jos raina pääsee tiivistymään liikaa nopean vedenpoiston ja vähäisten leikkausvoimien vuoksi. Rainan sulkeutuminen tapahtuu tavallisesti 0,8 - 1,4 % sakeudessa. Hyvän formaation saavuttamiseksi leikkausvoimien tulisi vaikuttaa myös massasuspension pintaosaan.

Rintapöytä on ensimmäinen vedenpoistoelin, jonka perälaatikosta tuleva huulisuihku kohtaa viiralla /43/. Toimintaperiaatteeltaan rintapöytä on samanlainen kuin useampi-listainen päästölistalaatikko. Rintapöytä koostuu yleensä kärkilistasta ja sitä seuraavista päästölistoista. Kärkilistan asennon tulee olla oikea, jottei vesi pääse tunkeutumaan takaisin rainaan. Rintapöydän rakenne, huulisuihkun optimaalinen iskukohta, huuliaukko b , huuliero L ja huulisuihkun lähtökulma α on esitetty kuvassa 13 (periaate lähteistä /2, 20/).



Kuva 13. Huulisuihkun optimaalinen iskukohta rintapöydällä.

Perälaatikon huulieron L (perälaatikon alahuulen kärjen vaakasuora etäisyys ylähuulen kärjestä) ja huuliaukon b suhteen L/b avulla voidaan säätää huulisuihkun osuma-kohtaa viiralla /61/. Pienellä L/b -suhteella (noin 0,5) huulisuihkun iskukulma on varsin jyrkkä ja suuremmalla L/b -suhteella (noin 1,0) huulisuihkun iskukulma on pieni.

Pienellä L/b -suhteella tapahtuvaa rainanmuodostusta kutsutaan painerainaukseksi (pressure forming) /61/. Suihkun iskuetäisyys on pienempi ja suihku on siten stabiilimpi. Painerainauksessa suuri määrä vettä poistuu suoraan viiran läpi. Tämä on edullista tilanteessa, jossa perälaatikosta tuleva huulisuihku on epästabiili. Suurella L/b -suhteella tapahtuvaa rainanmuodostusta kutsutaan nopeusrainaukseksi (velocity forming) /61/. Suihkun iskuetäisyys on pidempi, joten suihkun mahdolliset epästabiili-suudet voivat helposti vahvistua. Nopeusrainauksessa huulisuihku kulkee lähes samansuuntaisesti viiran kanssa ja osuu viiralle hyvin pienellä iskukulmalla juuri ennen rintapöydän kärkilistaa. Kärkilistan tehtävänä on tällöin kaavata pois huulisuihkun alapinnalla kulkeutuva ilmakerros, joka muuten kulkeutuisi viiralle formaatiota heikentäen.

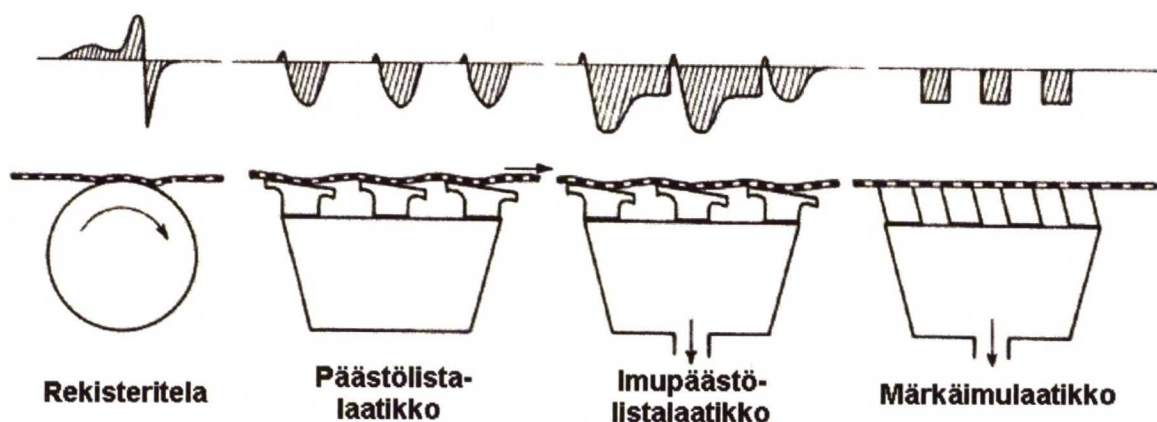
Kiviranta /26/ on tutkinut iskukulman ja rintapöydän etäisyyden vaikutusta taivekartongin runkokerroksen formaatioon. Formaatiota pystyttiin parantamaan lisäämällä kärkilistan kaavausta (lyhentämällä iskuetäisyyttä) ja kasvattamalla huulieroaa (iskukulmaa pienentämällä). Lisääntyneen alkusuotautumisen formaatiota parantava vaikutus perustuu nopeaan kuitumaton muodostumiseen ja nopean suotautumisen aiheuttamiin leikkausvoimiin. Tällöin myöskään perälaatikon synnyttämä turbulenssi ei ole vielä ehtinyt vaimentua kuitususpensiossa. Alkusuotautumista muuttamalla ei kuitenkaan pystytä merkittävästi parantamaan koko rainan formaatiota.

Käyttämällä 1,0:sta poikkeavaa suihku/viira-nopeussuhdetta voidaan suspensioon synnyttää tasonsuuntaisia leikkausvoimia /26, 61/. Vaikuttavana mekanismina tässä

on suihkun ja viiran välinen nopeusero, joka saa aikaan suotautuvan suspension ja viiran päälle jo suotautuneen rainan välisen liikkeen toistensa suhteen. Tämä liike on suurimmillaan heti huulisuihkun iskeytyessä viiralle pienentyen suotautumisen edistytessä kitkavoimien vaikutuksesta. Syntyvät leikkausvoimat vaikuttavat merkittävästi kuitujen orientoitumiseen ja muodostuvan rainan formaatioon. Käytännön paperinvalmistuksessa käyttökelpoiset suihku/viira-nopeussuhteet vaihtelevat 0,90 ja 1,10 välillä.

4.3.4 Vedenpoistoelimet

Kuvassa 14 on esitetty tavallisimmat tasoviiralla käytettävät vedenpoistoelimet ja niiden massasuspensioon synnyttämien impulssien muodot /62/. Viiran alapintaan tarttunut vesi tunkeutuu rekisteritelan pyöriessä viiran ja telan väliseen kitaan painaen vettä viiran läpi massasuspensioon, mikä aiheuttaa paineiskun ylöspäin. Rekisteritelan jättöpuolella vesi pyrkii puolestaan seuraamaan telaa alaspäin, mikä aiheuttaa impulssin. Viiran nopea edestakainen liike saa aikaan roiskeita, jotka ovatkin suuri ongelma käytettäessä rekisteriteloja nopeilla koneilla.

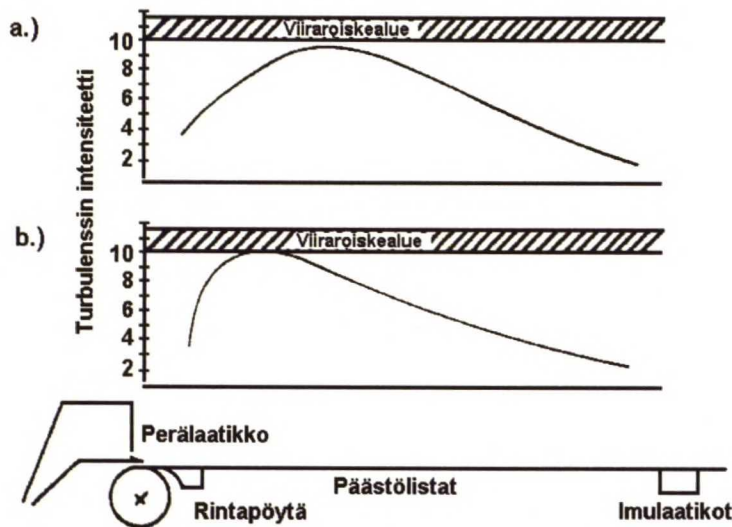


Kuva 14. Erilaisten vedenpoistoelimien aiheuttamat impulssit /62/.

Päästölista on viiraan toisesta reunastaan nojaava lista, joka muodostaa viiran kanssa pienen kulman ($0,5-4^\circ$) /62/. Päästölistoja käytetään joko yksinään tai useamman listan päästölistalaatikkoina, jotka voivat olla imulla varustettuja. Päästölista kehittää jättöpuolelleen tyhjän samalla periaatteella kuin rekisteritelakin, ja tyhjä on verrannollinen nopeuden neliöön. Päästölista ei aiheuta merkittävää paineiskua ylöspäin. Impulssin suuruus riippuu päästölistan leveydestä ja listan ja viiran välisen kulman suuruudesta. Varustamalla päästölistalaatikko imulla voidaan saavuttaa huomattavasti suurempi ja osittain nopeudesta riippumaton vedenpoistokapasiteetti.

Märkäimulaatikon vedenpoistokyky on erittäin suuri verrattuna päästölistaan /62/. Käytetyt tyhjöt ovat varsin suuria. Liian voimakas vedenpoisto märkäimulaatikoilla voi kuitenkin johtaa kuituverkoston tiivistymiseen ja vedenpoiston vaikeutumiseen seuraavilla vedenpoistoelimillä. Märkäimulaatikolla tapahtuva vedenpoisto on luonteeltaan yhtäjaksoista ja häiriötöntä eikä se riipu koneen nopeudesta.

Turbulenssiprofiililla tarkoitetaan viiraosalla esiintyvän, massasuspensioon vaikuttavan turbulenssin muutosta konesuunnassa. Thorp ja Reese /63/ ovat todenneet, ettei ole olemassa yhtä oikeaa turbulenssiprofiilia joka tilanteeseen. Optimaalinen turbulenssi-profiili tulee määrittää tapauskohtaisesti käytettyjen massojen, perälaatikoiden, koneen ja ajonopeuden mukaan. Turbulenssin voimakkuutta voidaan helpoiten säätää päästölistojen määrää ja listakulmaa muuttamalla. Turbulenssin tulee vaikuttaa massasuspensioon varhaisesta vaiheesta alkaen ja sen voimakkuuden tulee nousta nopeasti suurimpaan arvoonsa. Raskailla neliömassoilla tämä on erityisen tärkeää, sillä massasuspension paksuus viiralla on hyvin suuri (kuva 15, kohta b.)). Kevyillä neliömassoilla turbulenssin kehittymisnopeus voi olla hitaampi (kuva 15, kohta a.)).



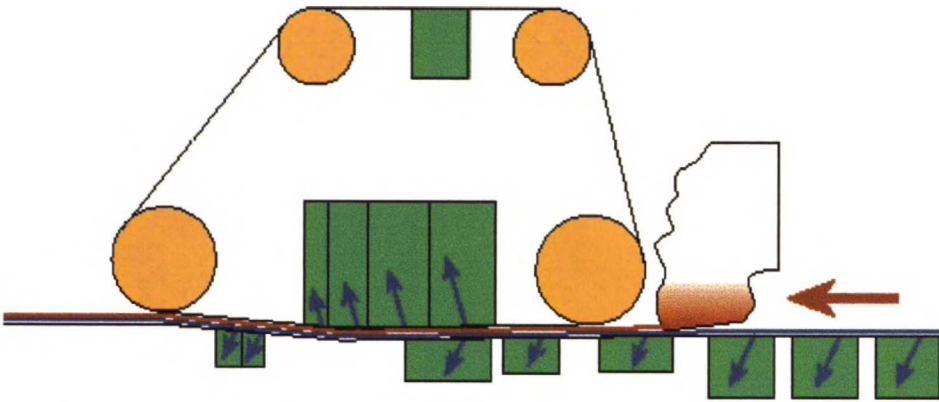
Kuva 15. Optimaaliset turbulenssiprofiilit tasoviiraosalla kevyen neliömassan (a.) ja korkea neliömassan (b.) rainoille /63/.

Vaikka edellä todettiin massapinnan värähtelyn vaikutuksen formaatioon olevan pienen, on vedenpoistoelimien oikeaoppinen ja tehokas käyttö tärkeää riittävän vedenpoistokapasiteetin saavuttamiseksi /50, 51, 64/. Tämä mahdollistaa alhaisen perälaattikosakeuden käytön, millä puolestaan on huomattava formaatiota parantava vaikutus.

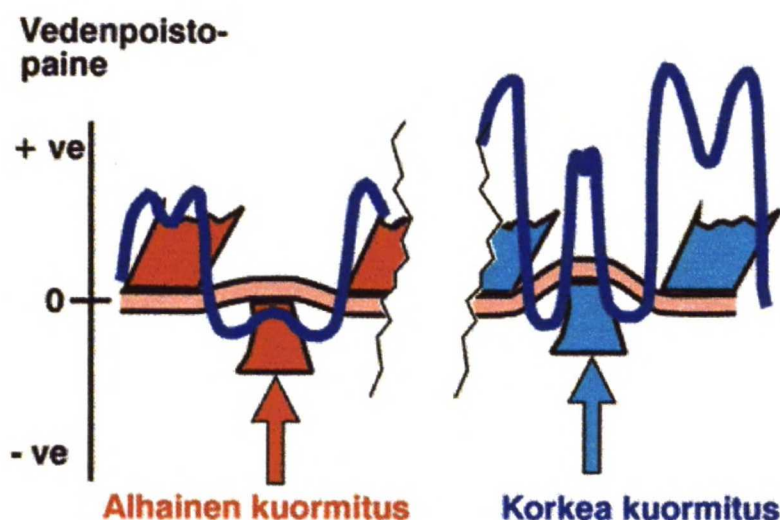
4.3.5 Yläpuolinen vedenpoistoyksikkö (formeri)

Tasoviirilla on vaikea aikaansaada riittäviä leikkausvoimia rainan yläosaan /43/. Asentamalla yläpuolinen vedenpoistoyksikkö tasoviiralle voidaan saavuttaa parempi formaatio samalla perälaatikkosakeudella ja massakoostumuksella /50/. Tämä johtuu hybridiformerin kidassa syntyvistä nopeuseroista, jotka pystyvät repimään suotautumattomassa massassa olevia kuitukimppuja rikki. Myös viiraosan vedenpoistokapasiteetti lisääntyy huomattavasti.

Telaformereilla voidaan aikaansaada kestoaltaan pitkiä mutta voimakkuudeltaan pieniä leikkausvoimia /50/. Listaformereilla leikkausvoimien kesto lyhenee mutta vastaavasti niiden voimakkuus lisääntyy (esimerkiksi Beloitin Bel-Bond -former, kuva 16). Tällöin retentio yleensä heikkenee mutta formaatio paranee. Sopivasti tela- ja listarainausta yhdistelemällä päästään edellisiä parempaan formaatioon hyvällä retentiolla. Uusinta kehitystä edustavat säädettävillä kuormituselementeillä varustetut formerit (kuva 17), joissa voidaan käyttää hallitusti erittäin voimakkaita leikkausvoimia (esimerkiksi Metson SymFormer MB ja Voithin DuoFormer D).



Kuva 16. Bel-Bond -formeriyksikkö ja toisioperälaatikko /65/.



Kuva 17. Säädettävillä kuormituselementeillä varustetun formerin vedenpoistopaine /66/.

4.3.6 Formaation parantamiseen tähtäävät ratkaisut

Lähinnä vanhoilla ja hitailla koneilla voidaan käyttää formaation parantamiseen viiran ravistusta. Ravistuksen avulla pyritään rikkomaan viiralla olevia kuitususpension flokkeja /44, 61, 67/. Viiran ravistuksen tehokkuus on suoraan verrannollinen ravistuksen amplitudiin ja taajuuden neliöön sekä kääntäen verrannollinen koneen nopeuteen.

Uritettu huulilista soveltuu lähinnä vanhojen perälaatikoiden formaation parantamiseen /44, 61, 67/. Uritetun huulilistan avulla muodostetaan huulisuihkuun paksumpia ja ohuempia harjanteita. Näille harjanteille saadaan tehtyä vaihesiirto suljetun rintapöydän listojen avulla, jotka saavat aikaan voimakkaita poikkisuuntaisia virtauksia ja leikkausvoimia, jotka voivat puolestaan hajottaa flokkeja. Vastaavalla tavalla vaikuttavia harjanteita voidaan muodostaa massasuspensioon myös formaatiosuihkujen avulla.

Myös viirarullan avulla voidaan pyrkiä parantamaan tasoviirakoneen formaatiota. Viirarullan kidassa huopautunut raina puristuu kokoon ja vettä nousee vaipan läpi viirarullan sisään /44, 61, 67/. Viirarullan formaatiota parantava vaikutus perustuu suotautumattoman massasuspension ja viiralla olevan kuitumaton välille syntyvään nopeuseroon, mikä saa aikaan flokkeja hajottavia leikkausvoimia. Nopeuseroa vastaa viirarullan sisä- ja ulkopinnan välillä vaikuttava paine-ero. Viirarullan formaatiota parantava vaikutus heikkenee kuitenkin paperikoneen nopeuden noustessa ja samalla viirarullan aiheuttama veden roiskuminen lisääntyy merkittävästi.

5 FORMAATION VAIKUTUS KARTONGIN PINTAOMINAI-SUUKSIIN

5.1 Yleistä

Paperin neliömassan pienimittakaavainen epätasaisuus heijastuu paperin pintaominaisuuksiin ja rakenteeseen aiheuttaen niissä pienimittakaavaista vaihtelua /33/. Paperinvalmistusprosessin aikana rainan painavampiin kohtiin kohdistuu erilainen käsittely kuin kevyempiin kohtiin. Näin tapahtuu etenkin märkäpuristuksessa ja kalanteroinnissa. Valmiissa paperissa painavat ja kevyet kohdat poikkeavat tästä syystä toisistaan huokosrakenteeltaan, pintaominaisuuksiltaan, lujuudeltaan, tiheydeltään, optisilta ominaisuuksiltaan, kokoonpuristuvuudeltaan ja useimmiten myös paksuudeltaan.

Rakenteen ja pintaominaisuuksien pienimittakaavainen vaihtelu aiheuttaa ongelmia myös paperinjalostuksessa ja paperin painatuksessa /33, 68/. Vaihtelun johdosta paperin eri kohdat käyttäytyvät prosessissa eri tavoin, minkä vuoksi jalostusprosesseissa voi esiintyä häiriöitä ja painojäljessä havaitaan epätasaisuutta.

Vaikka teoriassa formaation vaikutuksen paperin pintaominaisuuksiin ja rakenteeseen pitäisi olla selvä, on asiasta tehdyissä tutkimuksissa päädytty osittain ristiriitaisiin tuloksiin /29, 69, 70/. Ilmeisesti paperinvalmistusprosessin stokastinen luonne ja vaikeasti hallittavat vuorovaikutukset peittävät alleen formaation vaikutuksen. Näyttäisi lisäksi siltä, että formaation vaikutus päällystetyn paperin ominaisuuksiin on epäselvä /70/, vaikka formaation vaikutus pohjapaperin /70/ tai päällystämättömän paperin /29/ ominaisuuksiin voidaankin osoittaa selvästi.

Drage et al. /69/ ovat pilot-mittakaavassa osoittaneet paperin kiillon, lujuusominaisuuksien, optisten ominaisuuksien, sileyden ja painojäljen laadun paranevan pohjapaperin formaation parantuessa. Tämä vaikutus oli suurempi puupitoisilla painopapereilla kuin päällystetyllä hienopaperilla. Teräpäällästyksessä formaation vaikutus oli suurempi kuin filmipäällästyksessä. Taulukossa 8 on esitetty yhteenveto pohjapaperin formaation parantamisen vaikutuksista päällystetyn hienopaperin ominaisuuksiin.

Taulukko 8. Pohjapaperin formaation parantamisen vaikutukset päällystetyn hienopaperin ominaisuuksiin /69/.

Ominaisuus	Superkalanteroidut arkit	Soft-kalanteroidut arkit
Kiilto	Kasvaa	Kasvaa
Vaaleus	Kasvaa	Kasvaa
Opasiteetti	Kasvaa	Ei vaikutusta
Sileys (PPS 10)	Kasvaa	Kasvaa
Painojäljen kiilto	Kasvaa	Kasvaa
Painojäljen densiteetti	Ei vaikutusta	Kasvaa
Painojäljen visuaalinen arvio	Kasvaa	Kasvaa

Päällystykseen onnistumiseen vaikuttavat pohjapaperin sileys, huokoisuus ja huokoskokojakauma, kokoonpuristuvuus, vähäinen toispuolisuus, mekaanisten vikojen vähäisyys, palstautumislujuus, jäykkyys ja vaaleus /71/. Pohjapaperin formaatio vaikuttaa päällystettävyyteen juuri näiden tekijöiden kautta. Teräpäällystyksessä sileys, huokoisuus, huokoskokojakauma ja absorptio-ominaisuudet vaikuttavat päällystemäärään. Pohjapaperin sileyden tulee olla sellainen, että ensimmäinen teräpäällystys täyttää pinnan mikrohuokoset /26/. Tiheällä ja hydrofobisella pohjapaperilla sileyden merkitys korostuu.

5.2 Sileys

Paperin pinnan sileyteen formaatiolla on selvä vaikutus. Itse asiassa paperiin syntyy makrokarheutta (0,1-1 mm) juuri formaation synnyttämien paksumpien ja ohuempien kohtien vaikutuksesta /72/. Mitä karheampaa paperi on, sitä enemmän tarvitaan päällystettä peittämään paperin pintaa. Näin formaatio vaikuttaa myös päällystetyn paperin pinnan sileyteen.

Sileyttä hallitaan paperinvalmistuksessa pääasiassa kalanteroinnilla. Kalanteroinnissa paperin pinnan karheus alenee suhteessa enemmän kuin paperin paksuus. Formaation vaikutuksesta kalanteroimattomassa paperissa voidaan havaita paksuusvaihtelua /29, 72/. Paikallisen neliömassan ja paksuuden välillä esiintyy lähes lineaarinen korrelaatio. Kalanteroitaessa paperia paksut kohdat painuvat kokoon enemmän kuin ohuet. Ohuemmat kohdat jäävät tämän vuoksi karheammiksi kuin paksut. Paksuissa kohdissa tapahtuu myös opasiteetin ja huokoisuuden alenemista. Soft-kalanteroinnin avulla voidaan välttää näitä negatiivisia ilmiöitä /68/. Paksuus ei tasoitu yhtä paljon kuin kovanippisessä kalanteroinnissa, mutta sileyden ja huokoisuuden paikalliset vaihtelut pienenevät selvästi.

Hua et al. /70/ eivät havainneet saamiensa tulosten mukaan korrelaatiota päällystetyn paperin sileyden ja formaation välillä, vaikka tässäkin tapauksessa pohjapaperin sileyden korreloi formaation kanssa. Juvonen /10/ on toisaalta havainnut monikerroslaboratorion kartonkeja tutkiessaan pintakerroksen formaation vaikuttavan koko kartongin karheuteen.

5.3 Huokoisuus

Formaatio vaikuttaa myös paperista mitattuihin läpäisyominaisuuksiin /33/. Formaation huonontuessa opasiteetti huononee ja ilmanläpäisevyys kasvaa. Tämä riippuvuus on sitä heikempi, mitä korkeammasta neliömassasta on kyse. Kartonkien tapauksessa vaikutus on usein hyvin vähäinen, kun taas sanomalehtipaperin tapauksessa vaikutus voi olla hyvin merkittävä. Huonon formaation omaavilla ohuilla paperilajeilla onkin usein ongelmia pienten huokosreikien tiheän esiintymisen kanssa.

Formaation vaikutuksesta paksummat, neliömassaltaan keskimääräistä painavammat kohdat painuvat paperia kalanteroitaessa kokoon enemmän kuin ohuet /29/. Paksuissa kohdissa tapahtuu tiheyden kasvua ja huokoisuuden alenemista enemmän kuin ohuissa kohdissa.

Huokoisuuden osalta myös kokeelliset tulokset näyttävät pitävän paremmin yhtä teorian kanssa. Kivirannan mukaan /26/ formaation parantuessa paperin huokoisuus pienenee selvästi, kun muutos saatiin aikaan pienentämällä perälaatikkosakeutta. Myös Hua et al. /70/ havaitsivat formaation paranemisen pienentävän sekä päällystetyn että päällystämättömän paperin huokoskokojakaumaa ja keskimääräistä huokoskokoa. Samalla paperin bulkki alenee flokkikoon pienetessä.

5.4 Kiilto

Paperin kiillolla kuvataan paperin kykyä peiliheijastaa sille osuvaa valoa /72/. Paperin optinen karheus (alle 1 μm) on tärkein kiiltoon vaikuttava tekijä. Kiiltomittauksen tulos suhteutetaan täysin sileän pinnan tulokseen, joten kiilto mittaa samalla paperin sileyttä. Pigmenttipäällystyksessä päällyste peittää pohjapaperin huokosia pienentäen samalla paperin mikrohuokoisuutta ja parantaen kiiltoa.

Drage et al. /69/ havaitsivat kiillon paranevat formaation parantuessa sekä LWC-paperilla että päällystetyllä hienopaperilla. Kiviranta /26/ on todennut pohjakartongin formaation vaikuttavan jenkkisylinterillä saavutettavan kiillon ja päällystysten jälkeisellä kalanteroinnilla saavutettavan kiillon tasaisuuteen. Hua et al. /70/ eivät puolestaan havainneet saamiensa tulosten mukaan korrelaatiota päällystetyn paperin kiillon ja formaation välillä, vaikka pohjapaperin kiilto korreloi vahvasti formaation kanssa.

5.5 Painettavuus

5.5.1 Neliväriarkkioffset-painatus

Offset-painatuksessa painolevy jakautuu hydrofobisiin ja hydrofiilisiin alueisiin /73, 74/. Kostutusvesi leviää painolevyn hydrofiilisille alueille estäen painovärikerroksen muodostumisen näille alueille. Painoväri puolestaan leviää hydrofobisille alueille, jotka muodostavat kuva-alueen painettaessa. Painolevyltä painoväri ja kostutusvesi siirtyvät kumikankaalle ja siitä edelleen vastatelaan vasten muodostuvassa painonipissä paperin pinnalle.

Painoväri kovettuu arkkioffsetmenetelmässä matalaviskoottisen liuotinkomponentin suotautuessa päällysteen kapillaareihin /74/. Suotautumisvaihetta kutsutaan painoväriin asettumiseksi. Lopullinen painoväriin kovettuminen tapahtuu sideaineen polymerisoinnissa hapen vaikutuksesta.

5.5.2 Painojäljen epätasaisuus

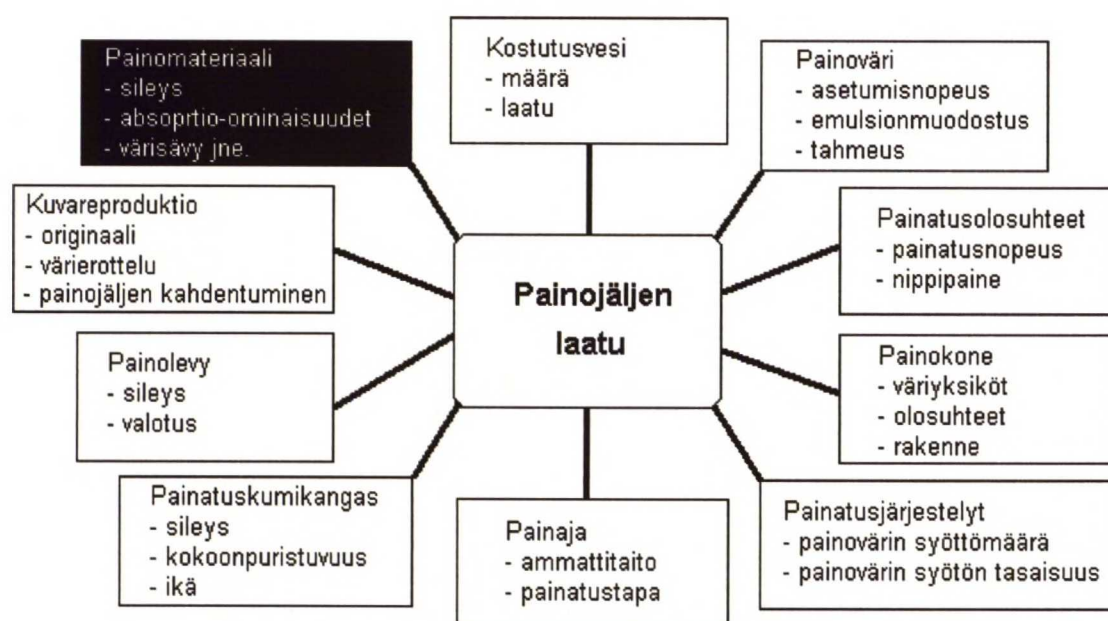
Painojäljen laatu on enemmän tai vähemmän subjektiivinen käsite, joka kuvaa painojäljen ominaisuuksia kuten densiteettiä, kiiltoa, värien kirkkautta, reunojen terävyyttä ja kaikkien näiden ominaisuuksien vaihtelua. Lyne /75/ on osoittanut, että painojäljen epätasaisuus on tärkein ominaisuus painojäljen laadun subjektiivisessa arvioinnissa. Kajanto /68/ käyttää painojäljen epätasaisuuden mittana painojäljen hajaheijastuksen keskihajontaa, mitä hän pitää parempana kuin yleisesti käytettyä varianssikerrointa. Kajannon mukaan keskihajonta korreloi paremmin ihmisten subjektiivisten arvioiden kanssa, kun taas varianssikerroin on tässä tapauksessa liiankin objektiivinen.

Kajanto /68/ on osoittanut formaation vaikuttavan painojäljen epätasaisuuteen päällystämättömällä hienopaperilla. Hänen saamansa tulokset osoittavat kuitenkin myös,

ettei formaatio yksin ratkaise painojäljen laatua, vaan paperin, painoväriin ja painokoneen välisillä keskinäisillä riippuvuuksilla on myös merkitystä. Painojäljen epätasaisuuteen vaikuttavat muun muassa painoväri, nippipuristus ja offset-painatuksen kostutusvesi. Formaatio on silti muihin parametreihin verrattuna ylivoimainen pyrittäessä ennustamaan painojälkeä.

Painojäljen epätasaisuuden syntymiseen vaikuttaa myös kalanterointitapa. Kajannon /68/ saamien tulosten mukaan formaation vaikutusta painojäljen epätasaisuuteen voidaan kompensoida pehmeänippisellä kalanteroinnilla. Kovanippinen kalanterointi ei sen sijaan vähentänyt formaation synnyttämää painojäljen epätasaisuutta.

Formaation ja painojäljen tasaisuuden välistä yhteyttä määritettäessä tulee olla hyvin tarkka /37/. Formaation lisäksi painojäljen tasaisuuteen vaikuttavat ainakin paperin kokoonpuristuvuus, huokoisuus, absorptio-ominaisuudet ja sileyys sekä painatukseen liittyvät tekijät (kuva 18).



Kuva 18. Painojälkeen vaikuttavat muuttujat offset-painatuksessa /76/.

Offset-painatuksessa formaation vaikutus painojäljen laatuun on epäsuora /36, 77, 78/. Formaatio vaikuttaa painojäljen densiteettiin lähinnä paikallisen huokoisuuden ja sileyden vaihteluiden kautta. Korkea paperin pintakarheus johtaa huonoon painoväriin siirtymiseen painolevyltä paperille kun taas huokoisuuden vaihtelu johtaa epätasaiseen painoväriin imeytymiseen. Formaatio vaikuttaa merkittävästi painojäljen epäta-

saisuuteen vain silloin, kun se korreloi pintakarheuden tai huokoisuuden kanssa /79/. Formaation vaikutus paperin pinnan huokoisuuteen korostuu paperia kalanteroitaessa, sitä enemmän mitä korkeampaa kuormitusta käytetään.

Kajanto on tutkimuksissaan /79/ osoittanut, että päällystämättömän hienopaperin painojäljen epätasaisuus korreloi formaation kanssa. Tulosten mukaan paikalliset neliömassavaihtelut selittävät keskimäärin neljäsosan painojäljen tummuusvaihtelusta, mutta selitysaste vaihtelee välillä 0-60 %. Selitysaste on sitä korkeampi, mitä huonompi formaatio ja korkeampi absoluuttinen painojäljen epätasaisuus paperilla on. Riippuvuuteen vaikuttavat myös painatusolot ja kalanterointi. Kajannon mukaan havaitut vuorovaikutukset ovat samansuuntaisia myös muilla paperilajeilla.

Bery, Davis ja Mallory /80/ ovat ottaneet käyttöön käsitteen rakenteellinen painettavuus. Käsitteen taustalla on huomio siitä, että hyvän painojäljen omaavilla kartongeilla on yleisesti ottaen tasainen formaatio ja hyvä sileys. Rakenteellinen painettavuus on määritetty sileyden ja formaation avulla. Rakenteellisen painettavuuden havaittiin selittävän yli 90 % offset-painatuksen painojäljen laadun vaihtelusta päällystetyillä kartongeilla.

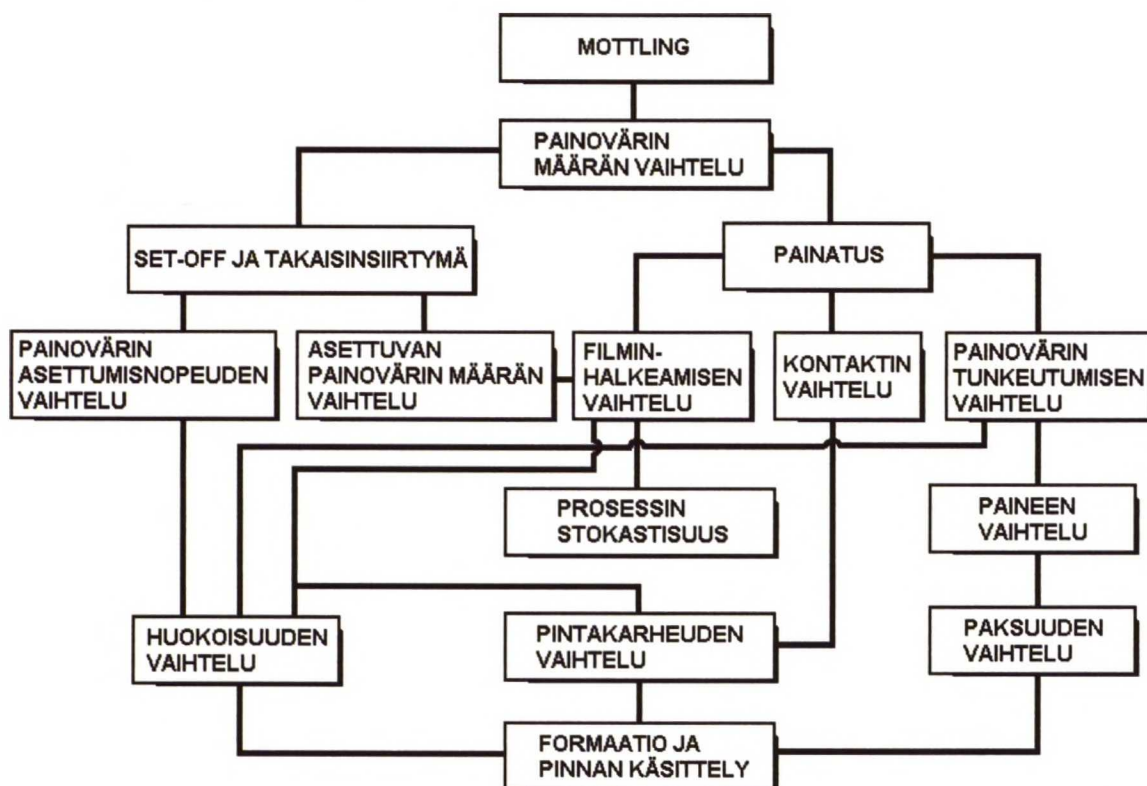
Lyhyellä aikavälillä painettavuuden ongelmia voidaan yrittää korjata painatusmuuttujien avulla /81/. Pitkällä aikavälillä painettavuutta voidaan parantaa paperinvalmistusta ja päällystystä kehittämällä.

5.5.3 Painojäljen laikullisuus (mottling)

Mottling eli painojäljen laikullisuus viittaa mittakaavassa 1-10 mm (taajuudella $0,1...1 \text{ mm}^{-1}$) esiintyvään alhaisen kontrastin kohinaan /29, 81, 82, 83/. Mottlingilla tarkoitetaan tavallisesti painojäljen tummuusasteen eli densiteetin vaihtelua. Joskus mottlingilla voidaan tarkoittaa myös painojäljen kiiltovaihtelua. Usein myös yleistä painojäljessä esiintyvää kohinaa kutsutaan mottlingiksi. Mottling määritetään tavallisesti painetun pinnan kaksiulotteisista digitaalikuvista kuva-analyysin avulla.

Painojäljen laikullisuuden käsitteellä pyritään kuvaamaan paperin formaation aiheuttamaa kohinaa, vaikka formaation ja mottlingin välinen yhteys on erittäin monimutkainen ja useita yhdysvaikutuksia sisältävä. Bernie ja Douglas /77/ ovat tosin todenneet formaation epätasaisuuden mittakaavassa 4-8 mm olevan erittäin haitallista hienopa-

perin painojäljen laadulle. Kajanto /29/ tutki puolestaan formaation ja offset-menetelmällä painetun päällystämättömän paperin painojäljen laikullisuuden välistä yhteyttä vertaamalla toisiinsa formaatiota ja painojäljen epätasaisuutta sekä pisteittäin samasta paperista että eri formaatiotason omaavista papereista. Kajannon käsitys tästä yhteydestä on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Formaation ja mottlingin välinen riippuvuus offset-painatuksessa /78/.

Mottling syntyy päällystetyn paperin fysikaalis-kemiallisten ominaisuuksien paikallisen vaihtelun seurauksena /84, 85, 86/. Tärkein mottlingin syntyyn vaikuttava tekijä on pintahuokosten koon ja rakenteen epätasainen jakautuminen paperin pinnassa. Liu-koisia sideaineita sisältävillä pastoilla mottlingia voi syntyä myös päällysteen si-deainevaelluksen seurauksena. Formaatio vaikuttaa painojäljen laikullisuuteen pääl-lystemäärän vaihtelun kautta. Päällystemäärän vaihdellessa päällysteen kuivuminen ja kuiva-ainepitoisuuden nousun seurauksena tapahtuva jähmettyminen on epäta-saista. Paksun päällystekerroksen alueista syntyy huokoisempia ja ohuemman pääl-lystekerroksen alueista tiiviimpiä alueita. Yhtä yhtenäistä teoriaa mottlingin synnystä ei kuitenkaan ole pystytty luomaan /85/.

Plowman-Sandreuter /81/ on kehittänyt laboratoriopainatukseen perustuvan menetelmän, jonka avulla voidaan erottaa mottlingin kolme perusmuotoa toisistaan niiden syntymekanismeja tarkastelemalla. Nämä kolme perusmuotoa ovat takaisinsiirtymälaikullisuus (BTM, backtrap mottle), märkähylkivyyksilaikullisuus (WIM, water interference mottle) ja painoväriin siirtymälaikullisuus (WTM, wet ink trap mottle).

Offset-painatuksessa esiintyy takaisinsiirtymälaikullisuutta silloin, kun painoväri ei siirry tasaisesti painonipissä kumikankaalta paperin pintaan /73, 81, 85/. Tärkein takaisinsiirtymälaikullisuutta aiheuttava tekijä on vaihtelu paperin absorptioominaisuuksissa. Tällöin painoväriin liuotinkomponentit imeytyvät paikallisesti vaihtelevalla nopeudella, jolloin painoväriin asettuminen on epätasaista. Tämä vaikuttaa seuraavaksi painettavan värin siirtymiseen epätasaisen filminhalkeamisen kautta. Myös painoväriin sisäinen epästabiilisuus voi aiheuttaa epätasaista painoväriin siirtymistä paperin pinnalle.

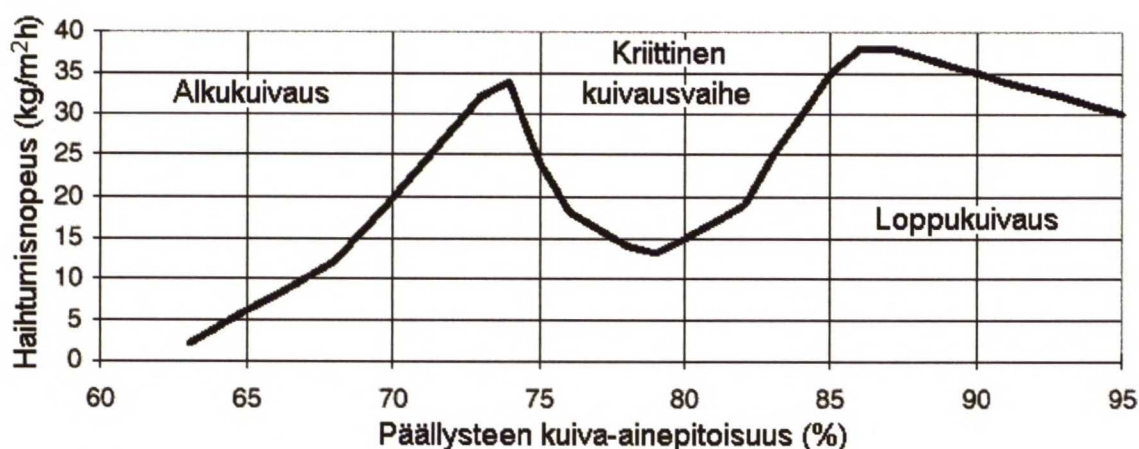
Takaisinsiirtymälaikullisuutta voi esiintyä silloin, kun painokoneessa on useampia painoyksiköitä, paperin absorptiokyky on hyvä, painoväri on nopeasti asettuvaa ja paperin absorptiokyky on epätasainen /81/. Yleisimmin takaisinsiirtymälaikullisuutta esiintyy ensimmäisissä painoyksiköissä (tavallinen painojärjestys nelivärioffset-painatuksessa on musta-syaani-magenta-keltainen) ja etenkin syaanilla värillä.

Märkähylkivyyksilaikullisuutta esiintyy painatuksessa silloin, kun kostutusvesi ei imeydy paperiin vaan se muodostaa paperin pinnalle kalvon, joka estää painoväriin siirtymisen paperille seuraavassa painoyksikössä /73, 81/. Syynä kostutusveden huonoon imeytymiseen voivat olla paperin huono absorptiokyky, kostutusveden liian suuri määrä, väärä kostutusveden koostumus tai väärä painoväriin ja kostutusveden yhdistelmä. Märkähylkivyyksilaikullisuutta voi esiintyä millä tahansa värillä ja missä tahansa painoyksikössä.

Painoväriin siirtymälaikullisuutta offset-painatuksessa esiintyy silloin, kun painovärien tahmeusjärjestys moniväripainatuksessa on väärä /81/. Ensimmäisen painoväriin, tavallisesti siis mustan, tahmeuden tulee olla korkein ja sitä seuraavien värien tahmeuksien tulee muodostaa aleneva sarja. Värifilmin halkeaminen painonipissä tapahtuu epätasaisesti ja väärästä kohdasta, jos painovärien tahmeusjärjestys on väärä.

Yleisenä sääntönä voidaan mainita, että huokoinen ja imukykyinen päällystetyn paperin pinta on altis takaisinsiirtymäaikullisuuden syntymiselle ja tiivis ja imukyvyltään huono päällystetty pinta on puolestaan altis märkähylkivyyksiaikullisuuden esiintymiselle /81/. Jos painovärin asettuminen on hidasta, ei takaisinsiirtymäaikullisuutta voi esiintyä, vaikka paperin pintarakenne olisi epätasainen.

Kuivatustavalla on huomattava vaikutus päällysteen laatuun ja siten päällystetyn paperin painettavuusominaisuuksiin /83, 86, 87/. Vääränlainen kuivatus voi johtaa pinnan epätasaisiin absorptio-ominaisuuksiin lähinnä sideainevaelluksen kautta. Alku-kuivatus voidaan suorittaa hyvin nopeasti päällysteen laadun siitä kärsimättä. Kriittisessä kuivatusvaiheessa päällyste jähmettyy ja sen lopullinen huokosrakenne muodostuu. Liian tehokas kuivatus kriittisessä vaiheessa aiheuttaa sideainevaellusta. Loppukuivatusvaiheessa lopullinen päällysteen rakenne on jo muodostunut eikä kuivatustehoa tarvitse enää rajoittaa. Päällysteen laadun kannalta optimaalinen kuivausstrategia on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Optimaalisen päällysteen kuivausstrategian kolme vaihetta /83/.

Painetun paperin kiiltolaikullisuus aiheutuu painamattoman paperin pinnan epätasaisesta sileydestä ja kiillosta /29, 86/. Kiilto- ja sileysvaihtelu aiheutuu yleensä epätasaisesta pohjapaperin formaatiosta ja päällystemäärän vaihteluista.

6 KIRJALLISUUSOSAN YHTEENVETO

Kirjallisuusosassa on käsitelty graafista kartonkia tuotteena, formaation käsitettä ja mittausmenetelmiä, rainanmuodostuksen teoriaa, tasoviiraosan rainanmuodostusprosessia sekä formaation vaikutusta kartongin pintaominaisuuksiin.

Graafisia kartonkeja käytetään sekä graafisten painotuotteiden että vaativien kuluttajakkausten valmistukseen. Yhteistä näille kaikille käyttötarkoituksille on se, että ne vaativat kartongilta hyvää visuaalista ulkonäköä, hyvää painettavuutta ja riittäviä lujuusominaisuuksia.

Graafiset kartongit valmistetaan nykyisin useimmiten monikerrosrainaustekniikalla. Monikerrostekniikan avulla kartonkia pystytään tuottamaan suuremmalla tuotantopeudella, raaka-aineiden käyttöä pystytään optimoimaan ja monia kartongin laatuominaisuuksia pystytään parantamaan. Laadulliset parannukset kohdistuvat lähinnä kartongin formaation ja taivutusjäykkyyden parantumiseen. Suotauttamalla kartongin kerrokset erikseen voidaan neliömassan pienimittakaavaista vaihtelua vähentää. Kartongin taivutusjäykkyys pystytään optimoimaan soveltamalla I-palkkiteoriaa kartongin rakenteeseen.

Formaatiolla tarkoitetaan paperin neliömassan pienimittakaavaista vaihtelua paperin tasossa. Formaation mittakaavaksi on käytännössä vakiintunut aallonpituusalue 0,1...100 mm. Neliömassavaihtelu on ominaista paperinvalmistusprosessille, jossa vaihtelua synnyttää sekä itse prosessin satunnainen luonne että kuitujen taipumus muodostaa verkostoja. Massasuspension ominaisuudet, ajotapatekijät ja paperinvalmistusprosessin rakennetekijät vaikuttavat muodostuvan paperin formaatioon. Tärkeimmät osatekijät ovat keskimääräinen kuidunpituus ja perälaatikkosakeus.

Formaation kuvaaminen vaatii kahden tunnusluvun käyttöä. Näistä toinen kuvaa neliömassavaihtelun kokonaismäärää ja toinen pienten ja suurien flokkien jakaumaa. Yleisimmin käytettyjä formaation tunnuslukuja ovat neliömassan keskihajonta ja normeerattu neliömassahajonta, jotka kuvaavat neliömassavaihtelun kokonaismäärää. Nämä tunnusluvut voidaan helposti määrittää kaikkien formaation mittausmenetelmien avulla. Formaation mittaskaalaa kuvaavien suureiden laskemiseen tarvitaan sen si-

jaan kaksiulotteinen kuva näytteestä. Mittaskaalaa voidaan kuvata ominaisperimetrin tai mikroskaalan avulla.

Tavallisimpia formaation mittaamiseen käytettäviä menetelmiä ovat punnitseminen, optinen mittaus näkyvän valon avulla, suora β -säteilyn avulla tapahtuva mittaus sekä radiografia. Punnitus ei kuitenkaan ole käytännössä mahdollista pienen mitta-alan johdosta. Optisen mittauksen ongelmana on valon transmittanssin riippuvuus sekä paperin neliömassasta että paperin optisista ominaisuuksista ja niiden jakaumasta. Optinen mittaus on kuitenkin erittäin nopea ja soveltuu hyvin prosessin jatkuvaan seurantaan. β -säteilyn transmittanssin ja paperin neliöpainon välinen yhteys on puolestaan yksikäsitteinen ja mittaus on siten erittäin tarkka. Menetelmän ongelmana on sen hitaus. Kaksiulotteinen kuva paperin formaatiosta voidaan muodostaa radiografian avulla, jossa paperin neliömassavaihtelu muunnetaan valon transmittanssivaihteluksi β -säteilyn ja röntgenfilmin avulla.

Rainanmuodostus on paperinvalmistuksen osaprosessi, jossa massasuspensiosta muodostetaan homogeeninen massaraina. Rainanmuodostus on pääasiassa hydrodynaaminen prosessi, jossa muodostuvan rainan materiaalijakauman tasaisuuteen voidaan vaikuttaa hydrodynaamisten voimien avulla. Perälaatikon ja viiraosan vedenpoistoelinten avulla voidaan vaikuttaa massasuspension virtaustilaan ja siten muodostuvan rainan rakenteeseen.

Kuitujen verkonmuodostus eli flokkaantuminen tapahtuu massasuspensiossa kitkavoimien vaikutuksesta. Kuidut kietoutuvat toisiinsa ja jäävät taivutusjännityksen alaisiksi. Mitä pidempi kuitu on, sitä todennäköisemmin se muodostaa kuituverkostoja naapurikuitujensa kanssa. Lyhyillä ja pienen pituusmassan omaavilla kuiduilla saavutetaan selvästi pienin flokkautumistaipumus ja siten paras muodostuvan arkin materiaalijakauman tasaisuus.

Tasoviiraosalla raina muodostetaan vaakatasossa liikkuvan viiran päälle. Viiran alla sijaitsevat rintapöytä ja erilaiset vedenpoistoelimet, jotka tukevat viiraa ja aikaansaavat tarvittavan vedenpoistopaineen. Vedenpoisto viiraosalla jakautuu alkusuotautumiseen, varsinaiseen suotautumiseen ja tiivistymiseen. Suotautuminen tasoviiraosalla on aina jaksottaista. Vedenpoistoelinten asettelulla ja valinnalla voidaan merkittävästi

vaikuttaa vedenpoistoprofiiliin ja massasuspensioon vaikuttavien hydrodynaamisten voimien syntymiseen.

Paperin neliömassan pienimittakaavainen epätasaisuus heijastuu paperin pintaominaisuuksiin ja rakenteeseen aiheuttaen niissä pienimittakaavaista vaihtelua. Paperinvalmistusprosessin aikana, etenkin märkäpuristuksessa ja kalanteroinnissa, rainan painavampiin kohtiin kohdistuu erilainen käsittely kuin kevyempiin kohtiin. Valmiissa paperissa esiintyy tästä syystä vaihtelua huokosrakenteessa, pintaominaisuuksissa, lujuudessa, optisissa ominaisuuksissa, kokoonpuristuvuudessa, paksuudessa ja tiheydessä.

Paperin pinnan sileyteen formaatiolla on selvä vaikutus. Kalanteroimattomassa paperissa raskaammat kohdat ovat keskimääräistä paksumpia. Kalanteroitaessa paperin paksut kohdat painuvat kokoon enemmän kuin ohuet. Ohuet kohdat jäävät tämän vuoksi keskimääräistä karheammiksi. Paksuissa kohdissa puolestaan opasiteetti ja huokoisuus alenevat. Soft-kalanteroinnin avulla voidaan päästä kovanippistä kalanterointia tasaisempaan lopputulokseen.

Formaatio vaikuttaa myös paperista mitattuihin läpäisyominaisuuksiin. Formaation huonontuessa opasiteetti huononee ja ilmanläpäisevyys kasvaa. Formaation on myös havaittu vaikuttavan paperin kiiltoon. Formaation parantuessa paperin kiilto lisääntyy ja kiillon paikallinen vaihtelu vähenee.

Formaatio vaikuttaa epäsuorasti myös offset-painatuksen painojäljen laatuun. Painojäljen laikullisuuden, mottlingin, käsitteellä tarkoitetaan tavallisesti painojäljen densiteetin epätasaisuutta. Formaatio vaikuttaa densiteettiin lähinnä paikallisen huokoisuuden ja sileyden sekä päällystetyillä papereilla lisäksi päällystemäärän vaihteluiden kautta. Paikallisen neliömassavaihtelun on havaittu selittävän painojäljen tummuusvaihtelua sitä paremmin, mitä huonompi paperin formaatio on.

KOKEELLINEN OSA

7 KOKEELLISEN OSAN JOHDANTO

7.1 Tavoitteet ja toteutus

Kokeellisen osan tavoitteena oli parantaa pohjakartongin formaatiota ja kartoittaa formaation vaikutusta kartongin pintaominaisuuksiin. Formaation parantamiseen pyrittiin perälaatikoiden hallintasuureita optimoimalla, kartongin runkokerroksen keskimääräistä kuidunpituutta alentamalla ja muuttamalla neliöpainon jakautumista eri kerroksiin.

Formaation parantaminen ja sen vaikutusten kartoittaminen toteutettiin neljän kartonkikonekoeajon avulla. Näistä kolme ensimmäistä toteutettiin faktorikokeina ja neljäs, päälystämätön koeajo kolmen koepisteen sarjana. Ensimmäisessä koeajossa optimoitiin perälaatikoiden hallintasuureita formaation kannalta (suihku/viiranopeussuhde, huuliaukko ja huuliero), kahdessa seuraavassa koeajossa parannettiin formaatiota runkokerroksen koivuosuutta kasvattamalla ja muuttamalla kerrosneliöpainoja ja viimeisessä koeajossa tarkasteltiin formaation vaikutusta pohjakartongin pintaominaisuuksiin (päälystämätön koeajo). Koeajojen tavoitteet, menetelmät ja saadut tulokset on esitelty tarkemmin jokaisen koeajon yhteydessä.

Lisäksi pienimuotoisen kilpailijavertailun avulla pyrittiin tarkastelemaan formaation vaikutusta graafisten kartonkien pintaominaisuuksiin ja painettavuuteen. AFM-analyysin avulla verrattiin Ensocoat-kartongin pintarakennetta parhaan kilpailijan pintarakenteeseen painojäljen laatuerojen ja sileyserojen selvittämiseksi.

Formaatiolla tarkoitetaan tässä esityksessä kartongin pienimittakaavaista neliömassavaihtelua aallonpituusalueella 0,1-100 mm. Formaation mittana käytetään normeerattua neliömassahajontaa, joka on mitattu suoralla β -säteilymittauksella Ambertecin Beta Formation Tester -laitteella (liite 1).

Pintaominaisuuksia on seurattu koeajoissa normaalien laboratoriomääritysten ja muutamien erikoismenetelmien avulla. Mittausmenetelmät on esitelty tarkemmin liitteessä 1. Tärkeimpiä kartoitettuja pintaominaisuuksia olivat tässä työssä Bendtsen- ja PPS-sileydet, kiilto, vesiabsorptiokyky lyhyellä (Bristow) ja pitkällä aikavälillä (Cobb),

painatustulos, painojäljen laikullisuus, pinnan epätasaisuus (prescale), pinnan profiilikarheus (profilometri) ja päällysteen peittävyys (polttopeittävyys).

Seuraavassa on perehdytty tässä työssä käytettyjen faktorikokeiden suunnitteluun ja esitelly Imatran Kaukopäässä sijaitseva kartonkikone 2 niiltä osin, jotka ovat keskeisiä tämän kokeellisen osan ymmärtämiseksi.

7.2 Koesuunnittelu ja 3^m-faktorikokeet

Koesuunnittelu on keskeistä tilastotiedettä, kokeellisen tutkimuksen metodi /88/. Koevirheitä sisältävät havainnot on tarkoituksenmukaista analysoida tilastollisin menetelmin, jotka käyttävät satunnaisvaihtelua kuvaavia malleja.

Satunnaistaminen ja toistaminen ovat koesuunnittelun keskeisiä työtapoja, joilla voidaan vähentää systemaattiseen virheen vaaraa ja parantaa tarkkuutta /88/. Näiden käyttö prosessiteollisuudessa on kuitenkin usein ongelmallista. Prosessin vakaus voi häiriintyä vakavasti, jos prosessimuuttujia vaihdellaan satunnaisesti ääriarvosta toiseen. Toistamista puolestaan rajoittavat prosessiteollisuudessa usein esiintyvät pitkät viiveet, esimerkiksi paperikoneen rullaimella konerulla saatetaan vaihtaa vain kerran puolessatoista tunnissa.

Kahden arvotason koesuunnitelmilla etsitään suuresta muuttujajoukosta ne, joilla on merkittävää vaikutusta joko prosessin tai tuotteen tilasuureisiin /88/. Riippuvuuksien kartoituksessa pyritään selvittämään täsmällisemmin, millä tavalla merkitsevät muuttujat vaikuttavat tilasuureisiin. Pyritään rakentamaan riippuvuutta kuvaava matemaattinen malli, jonka muoto määräytyy fysikaalisin tai tilastollisin periaattein. Riippuvuuksia voidaan kartoittaa esimerkiksi faktorikokeilla.

3^m-faktorikokeella tutkitaan m tekijän vaikutusta vasteeseen /88, 89, s. 363-391/. Jokaiselle tekijälle annetaan kolme arvotaso, jotka koodataan tavallisesti -1 (alataso), 0 (keskipiste) ja +1 (ylätaso). Kaikki 3^m kappaletta koeyhdistelmiä toteutetaan ja tulokset analysoidaan sovittamalla koetuloksiin toisen asteen polynomi regressioanalyysillä /89, s. 392-426, 90, s.462-534/. Koesuunnitelmissa esiintyy jokaisen muuttujan kohdalla kolme täsmällistä arvotaso, mutta käytännössä nämä yleensä toteutuu täsmällisesti kaikissa kokeissa. Regressioanalyysi suoritetaan tällöin muuttujien toteutuneilla arvoilla.

Vaikka 3^m -faktorikoe ei olekaan paras ja tehokkain koesuunnitelma tarkasteltaessa toiseen asteen riippuvuuksia /89, s. 364-365/, sen käyttöön päädyttiin vähäisen tarvittavien koepisteiden lukumäärän vuoksi. 3^{m-1} -osafaktorikokeella koepisteiden määrää voidaan edelleen pienentää kolmasosaan täydellisen faktorikokeen koemäärästä, joskin tarkkuus heikkenee tällöin entisestään. Kolmen muuttujan tutkiminen vastepintamenetelmällä vaatii vähintään 16 kokeen suorittamista, kun 3^{m-1} -osafaktorikokeella selvittää 9 koepisteellä. Lisäksi päätettiin analysoida koeajoja edeltävä kartongin laatu referenssinäytteen avulla ja koeajon aikana tapahtuva mahdollinen laatuominaisuuksien ajautuminen toistamalla ensimmäinen koepiste koeajojen lopuksi.

Vastepintamenetelmiä pidetään yleisesti parhaana tapana tehdä koesuunnitelmia ja analysoida tuloksia /89, s. 427-510/. Vastepintamenetelmät soveltuvat erityisen hyvin käytettäväksi tilanteissa, joissa vasteeseen vaikuttaa monia tekijöitä ja tavoitteena on optimoida vaste. Vasteen arvoa voidaan kuvata graafisesti malliin sovitettujen vastepintojen avulla. Vastepintamenetelmien haittapuolena voidaan pitää suhteellisen suurta koemäärää, minkä vuoksi niitä ei voitu käyttää tässä työssä.

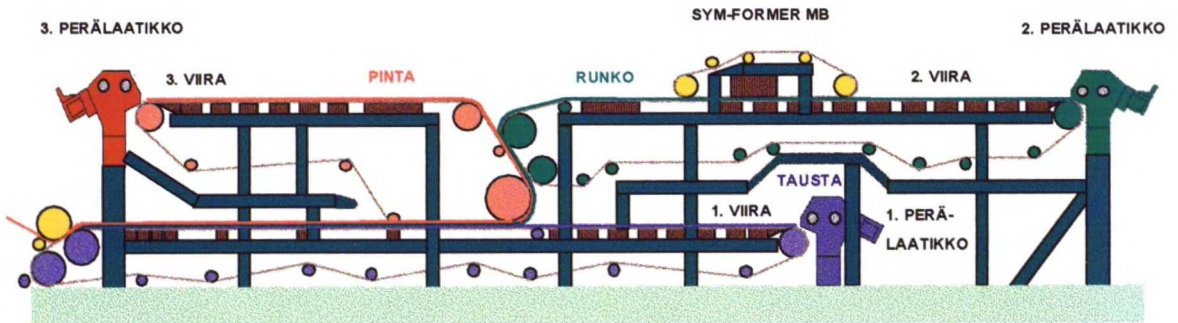
7.3 Kaukopään kartonkikone 2

Imatran Kaukopäässä sijaitseva kartonkikone 2 kuuluu Stora Enso Oyj:n Consumer Boards -tulosalueen Graphical Boards -tulosyksikköön. Kartonkikone on rakennettu vuonna 1956 ja modernisoitu on-line -konseptin mukaiseksi vuonna 1990. Viiraosalle lisättiin Valmetin SymFormer MB vuonna 1993. Kartonkikoneen kapasiteetti on 210 000 tonnia kartonkia vuodessa ja sen suurin ajonopeus on 550 m/min. Viiran leveys on 6,22 m ja suurin mahdollinen trimmin leveys on 5,60 m.

Kartonkikone 2 tuottaa graafisia kartonkeja sekä pakkaus-, kuppi- ja nestepakkaus-kartonkeja. Kartongit ovat kolmikerroksisia valkaistuja sellukartonkeja (SBS-kartonkeja). Pakkaus- ja nestepakkauskartonkilajeissa käytetään lisäksi CTMP-massaa kartongin runkokerroksessa. Kartongit voivat olla kokonaan päällystämättömiä, toiselta puoleltaan päällystettyjä tai molemmilta puolilta päällystettyjä. Yhdeltä puolelta päällystettyjen kartonkien taustapuoli voidaan lisäksi pigmentoida.

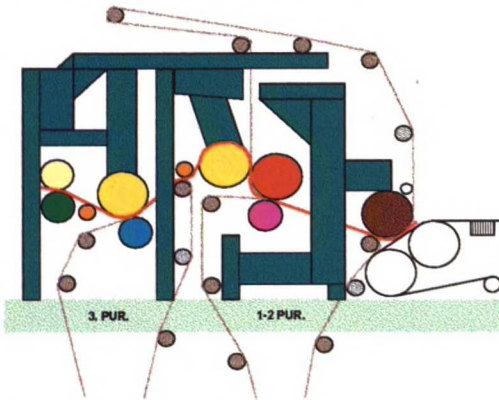
Kartonkikone 2:n kolmikerrosviiraosa on Tampellan valmistama. Se koostuu kolmesta erillisestä tasoviirasta. Perälaatikot ovat kaikki mitoitukseltaan samanlaisia TAMFLO R -reikätelaperälaatikoita. Runkokerroksen viiraosalla on lisäksi yläpuolisena veden-

poistoyksikkönä Valmetin SymFormer MB. Viiraosan tarkempi rakenne ja käytetyt nimitykset on esitetty kuvassa 21. Pintakerros muodostetaan kartonkikoneen 3-viiralla, runkokerros 2-viiralla ja taustakerros 1-viiralla.



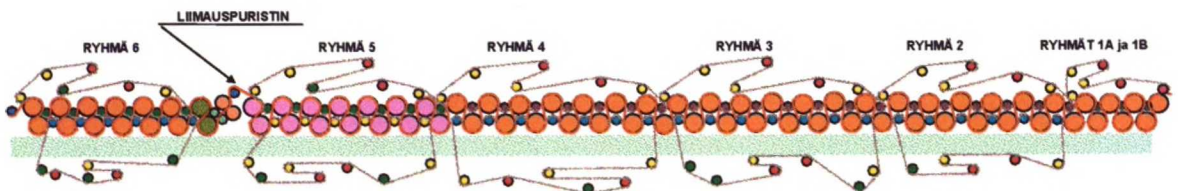
Kuva 21. Kartonkikone 2:n viiraosa /91/.

Kartonkikone 2:n puristinosassa on nelinippinen, joista kaksi viimeistä ovat erillisiä. Neljättä nippiä nimitetään tasauspuristimeksi, sillä siinä ei tapahdu varsinaista vedenpoistoa vaan tarkoituksena on vähentää kartongin toispuolisuuksia. Puristinosan rakenne on esitetty kuvassa 22.



Kuva 22. Kartonkikone 2:n puristinosassa /91/.

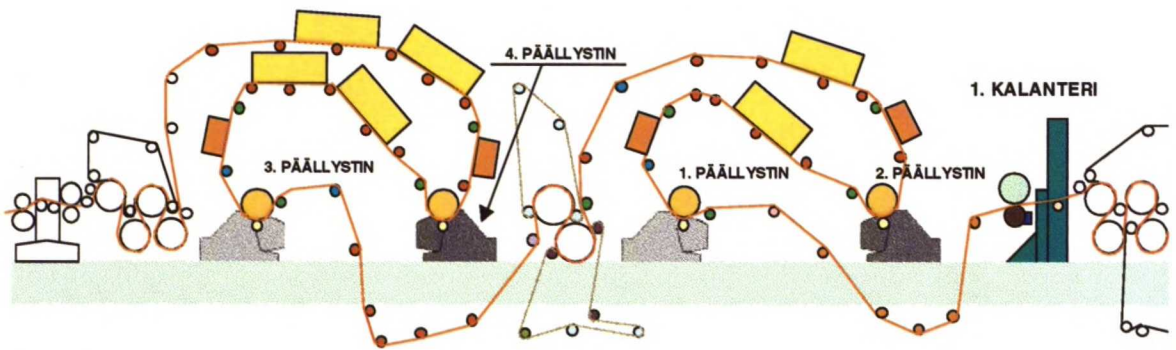
Kuivatusosalla on kuusi kappaletta kuivausryhmiä. Viidennen kuivausryhmän jälkeen sijaitseva liimapuristin edustaa perinteistä lammikkomallia. Kuivatusosan rakenne on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Kartonkikone 2:n kuivatusosa /91/.

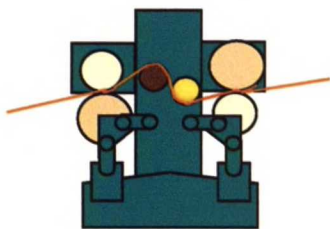
Kartonki kalanteroidaan kuivatusosan jälkeen 1-kalanterilla yhdessä terästelojen välisessä nipissä. Kartongin taustapuoli päällystetään päällystysasemilla 1 ja 3 ja pinta-
 puoli päällystysasemilla 2 ja 4. Päällystysasemat ovat Jagenbergin valmistamia Combi
 Blade -teräpäällystysasemia, joilla pastan applikointi tapahtuu sivelytelan avulla.
 Päällysteen kuivatukseen käytetään ensin infrapunakuivaimia (1 kpl / päällystysase-
 ma) ja sitten leijukuivaimia (1 kpl päällystysasemilla 1 ja 2 sekä 2 kpl päällystys-
 tysasemilla 3 ja 4).

Tavallisesti yksipuolisesti päällystetyillä tuotteilla päällystetään kartongin pintapuoli.
 Viira- ja päällystysosien täysin symmetrinen rakenne mahdollistaa kuitenkin myös
 taustapuolen päällystysen. Päällystysosan rakenne on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Kartonkikone 2:n päällystysosa /91/.

Päällystysosan jälkeen kartonki kuivataan vielä neljän kuivatussylinterin avulla. Lo-
 puksi kartonki kalanteroidaan Küsters-merkkisellä soft-kalanterilla. Kartongin jälkikel-
 lastumisen välttämiseksi soft-kalanterin teloissa pyritään käyttämään mahdollisimman
 alhaisia lämpötiloja. Kalanterin rakenne on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Kartonkikone 2:n soft-kalanteri /91/.

8 PERÄLAATIKOIDEN HALLINTASUUREIDEN OPTIMOINTI

8.1 Tavoitteet ja menetelmät

Tämän koeajon tavoitteena oli etsiä formaation kannalta edullisimmat perälaatikon hallintasuureiden arvot ja selvittää, mikä vaikutus hallintasuureiden muutoksilla oli kartongin tilasuureisiin. Perälaatikon hallintasuureet ovat yleisesti tunnettuja /57, 60, 61/, joten niitä ei lähdetty tässä työssä erikseen kartoittamaan. Pinta-, tausta- ja runkokerroksen formaatioita pyrittiin parantamaan muuttamalla suihku/viira-nopeussuhteita sekä perälaatikoiden huulieroja ja huuliaukkoja. Samalla voitiin varmistua siitä, että kerrospaksuuksien muuttamiseen ja lyhytkuituosuuden kasvattamiseen tähtäävät koeajot voitaisiin suorittaa tarkoituksenmukaisilla perälaatikoiden hallintasuureiden arvoilla.

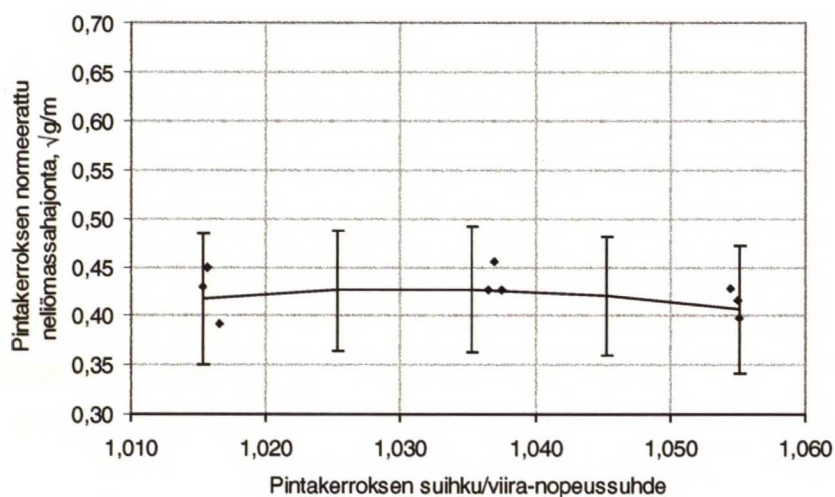
Koeajo suoritettiin 18.10.2001 Ensocoat 230 g/m² -lajilla. Koesuunnitelma (3³⁻¹-osafaktorikoe) on esitetty liitteessä 2. Hallintasuureiden arvot valittiin aikaisemman kokeuksen perusteella tarkoituksenmukaisiksi. Koeajon aikana valmistettu kartonki meni normaalisti asiakastilaisuuksiin, joten mitään kovin suuria muutoksia ei voitu tehdä. Tämä luonnollisesti pienensi myös vasteita, mikä johti tarkkuuden heikkenemiseen ja satunnaisvaihtelun suhteellisen osuuden kasvuun. Kaikki muut hallintasuureet pyrittiin pitämään vakioina koko koeajon ajan.

Koepisteissä toteutuneet hallintasuureiden arvot, saadut mittaustulokset ja koeajolosuhteet on esitetty liitteessä 3. Formaatio mitattiin Ambertecin Beta Formation Tester -laitteella sekä koko kartongista että kaikista kerroksista erikseen. Tulokset analysoitiin Statistica-ohjelmalla toiseen asteen useamman muuttujan regressiomallin avulla. Muuttujien yhteisvaikutuksia ei ollut mahdollista analysoida valitun koesuunnitelman rajoitusten vuoksi. Mallin luotettavuuden arviointiin jäi vain 2 vapausastetta, minkä vuoksi saadut selitysasteet ovat korkeita ja tulosten virhearviot suuria.

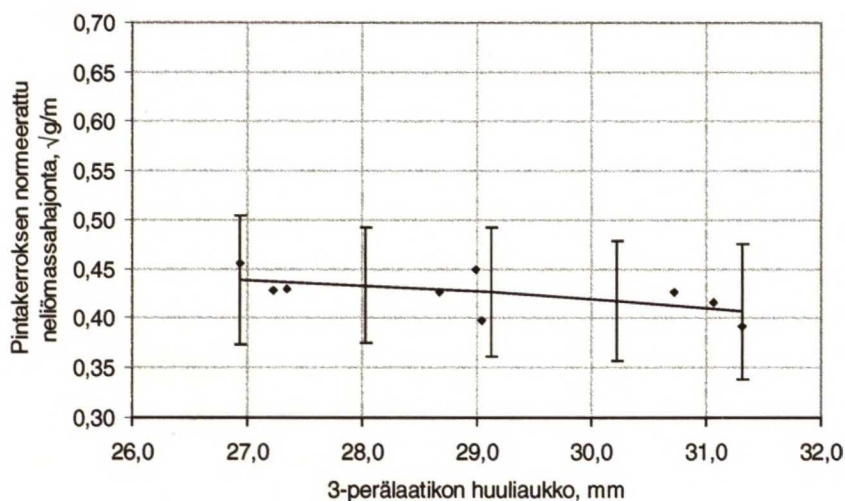
Seuraavassa on ensin käyty läpi hallintasuureiden optimointi kerroksittain, sitten tarkasteltu suihku/viira-nopeussuhteen ja huuliero/huuliaukko-suhteen merkitystä formaation kannalta ja lopuksi on tarkasteltu hallintasuureiden vaikutusta muihin kartongin laatuominaisuuksiin.

8.2 Pintakerros

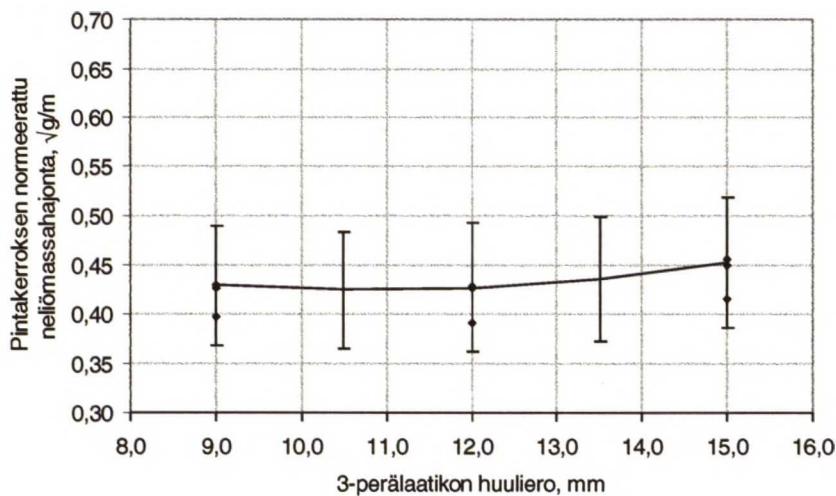
Pintakerroksen suihku/viira-nopeussuhteen, huuliaukon ja huulieron vaikutusta formaatioon on tarkasteltu kuvissa 26-28. Faktorikokeen tuloksiin sovitetun toisen asteen regressiomallin selitysasteeksi saatiin 85 % ($R^2=0,85$). Minkään hallintasuureen vaikutus ei osoittautunut merkittäväksi 95 % luottamustasolla. Toiseen asteen kuvaajat osoittautuivat varsin lineaarisiksi, joten tuloksiin kokeiltiin sovittaa myös 1. asteen regressiomallia, jolloin selitysasteeksi saatiin 63 %. Kuvaajien muoto pysyi käytännössä samana, vaikka virhearviot hieman pienenivätkin.



Kuva 26. Pintakerroksen suihku/viira-nopeussuhteen vaikutus formaatioon.



Kuva 27. 3-perälaatikon huuliaukon vaikutus formaatioon.

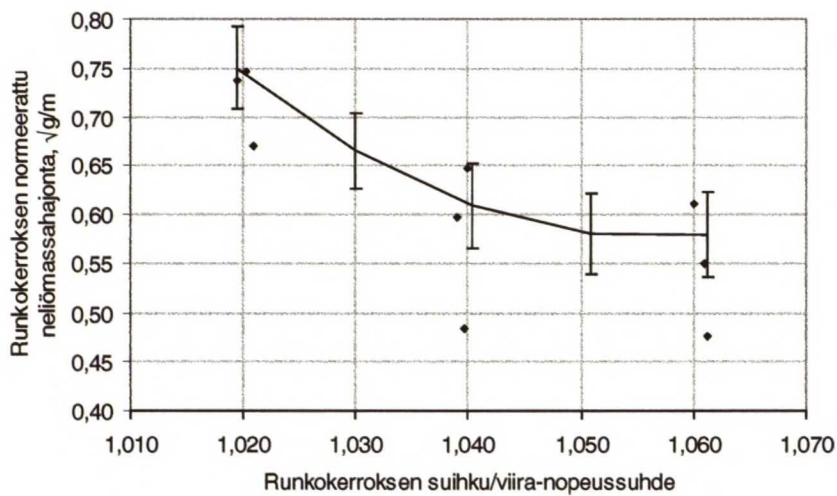


Kuva 28. 3-perälaatikon huulieron vaikutus formaatioon.

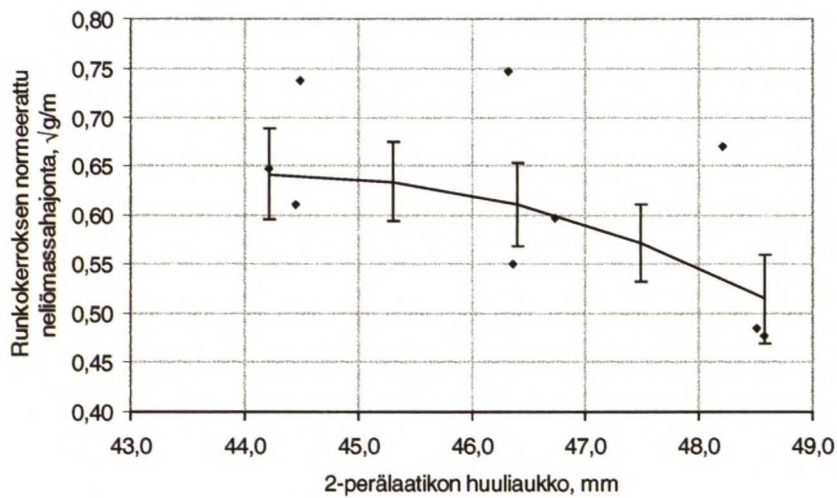
Pintakerroksen normeerattu neliömassavaihtelu muuttui vain vähän hallintasuureiden arvoja muutettaessa. Runko- ja taustakerrokseen verrattuna tämä käytös oli poikkeavaa. Ilmeisesti päällysteen tasoittava vaikutus pienensi pintakerroksen neliömassavaihteluita peittäen samalla hallintasuureiden vaikutuksen, tiedetäänhän teräpäällystyksessä päällystemäärän vaihtelevan pohjapaperin vaihtelua kompensoiden /39/. Suihkusuhteen vaikutus formaatioon oli myös teoreettiseen muotoon verrattuna päinvastainen eli alaspäin aukeavan paraabelin muotoinen, vaikka tällä suihku/viira-nopeussuhdealueella suihkusuhteen vaikutusta kuvaavan paraabelin tulisi aueta ylöspäin. Saatujen tulosten perusteella 3-perälaatikon huuliaukon tulee olla mahdollisimman suuri ja huulieron puolestaan noin 11 mm parhaan formaatiotason takaamiseksi.

8.3 Runkokerros

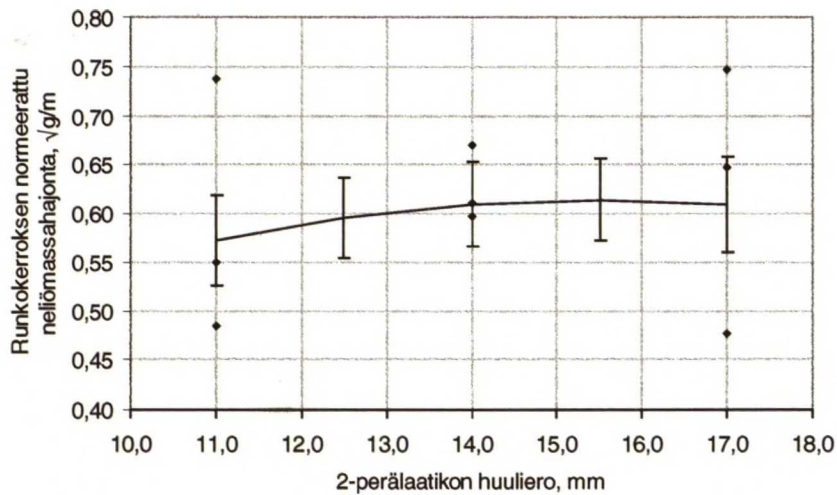
Runkokerroksen suihku/viira-nopeussuhteen, huuliaukon ja huulieron vaikutusta formaatioon on tarkasteltu kuvissa 29-31. Faktorikokeen tuloksiin sovitettuna toisen asteen regressiomallin selityssasteeksi saatiin 100 % ($R^2=1,00$). Hallintasuureista suihkusuhteen ja huuliaukon vaikutukset osoittautuivat merkittäviksi 95 % luottamustasolla. Runkokerroksen vasteet olivat huomattavasti pintakerroksen vasteita voimakkaampia. Tällöin myös kuvaajista voidaan havaita 3^m -faktorikokeille tyypillistä mittaustulosten erottumista toisistaan muiden koesuunnitelman faktoreiden vaikutuksesta (esimerkiksi kuvassa 31 mittauspisteet ovat selvästi kolmella eri tasolla).



Kuva 29. Runkokerroksen suihku/viira-nopeussuhteen vaikutus formaatioon.



Kuva 30. 2-perälaatikon huuliaukon vaikutus formaatioon.

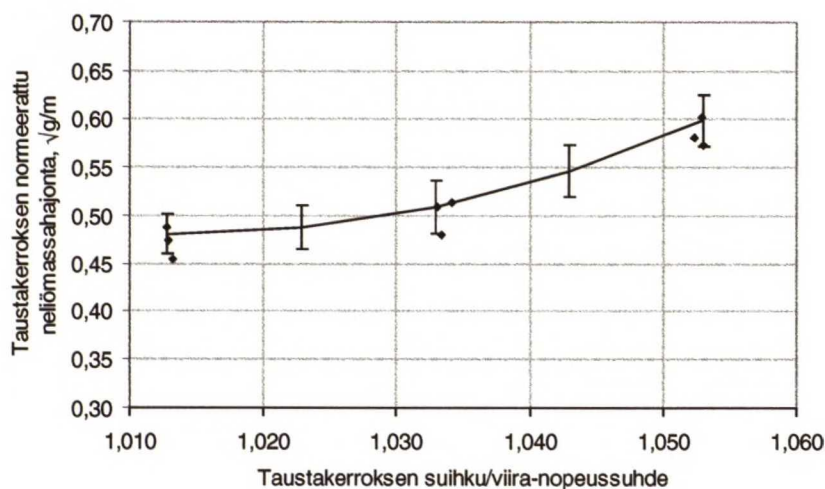


Kuva 31. 2-perälaatikon huulieron vaikutus formaatioon.

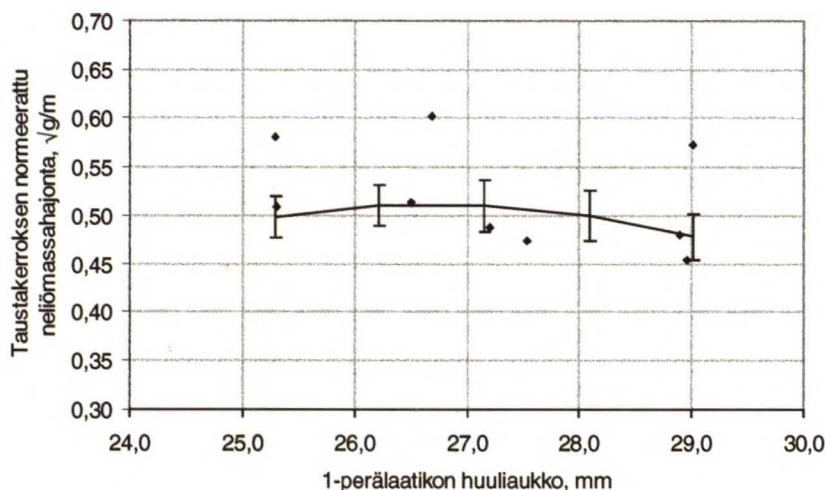
Runkokerroksessa hallintasuureiden vaikutusta on helppo tarkastella. Käytös on myös johdonmukaista ja teorian mukaista. Suihkusuhteen vaikutusta kuvaava paraabeli aukeaa ylöspäin, joskaan paraabelin muodon toteamista varten tarpeeksi suuria arvoja ei kokeiltu. Huuliaukon kasvaessa formaatio parani. Huulieron vaikutus oli suhteessa pienin ja paras formaatio saavutettiin huulierolla 11 mm.

8.4 Taustakerros

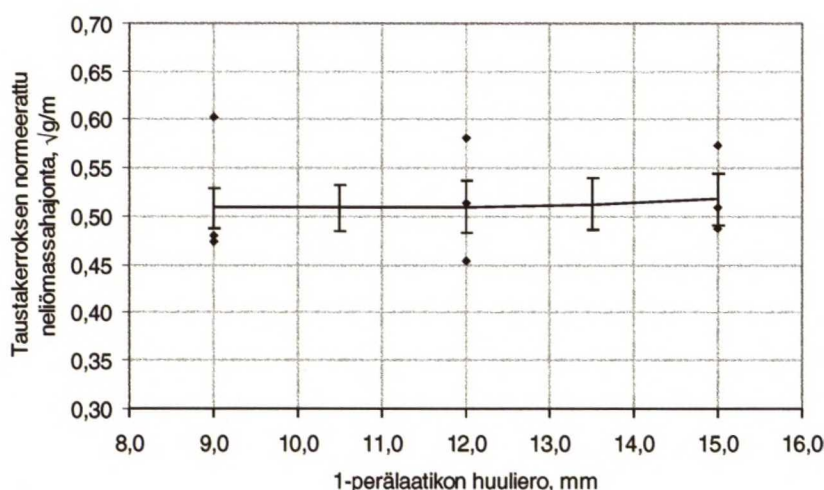
Taustakerroksen suihku/viira-nopeussuhteen, huuliaukon ja huulieron vaikutusta formaatioon on tarkasteltu kuvissa 32-34. Faktorikokeen tuloksiin sovitetun toisen asteen regressiomallin selitysasteeksi saatiin 100 % ($R^2=1,00$). Hallintasuureista suihkusuhteen vaikutus oli merkittävä 95 % luottamustasolla. Myös taustakerroksessa vasteet olivat selvät ja tarkasti havainnoitavissa.



Kuva 32. Taustakerroksen suihku/viira-nopeussuhteen vaikutus formaatioon.



Kuva 33. 1-perälaatikon huuliaukon vaikutus formaatioon.



Kuva 34. 1-perälaitikon huulieron vaikutus formaatioon.

Taustakerroksen suihkusuhteen vaikutusta formaatioon kuvaava käyrä (kuva 32) muodostaa ylöspäin aukeavan paraabelin puolikkaan. Formaation kannalta optimaalista suihkusuhdetta ei siis välttämättä edes kokeiltu tässä koeajossa. Hyvin pienillä suihkusuhteilla kokeita ei kuitenkaan voitu suorittaa, sillä muuten kuitujen konesuuntainen orientaatio olisi pienentynyt voimakkaasti. Suihkusuhteen optimiarvo näyttäisi kuitenkin olevan arvon 1,015 paikkeilla.

Huuliaukon kasvattaminen paransi formaatiota samalla kun perälaitikon sakeus aleni. Vastoin odotuksia formaatio kuitenkin aluksi heikkeni hieman ennen kuin alkoi selvästi paranemaan. Tämä selittyy satunnaisvaihtelun vaikutuksella. Huulieron vaikutus oli hyvin pieni koko kokeillulla alueella. Saatujen tulosten mukaan paras formaatio saavutetaan silloin, kun huuliero on välillä 9-12 mm.

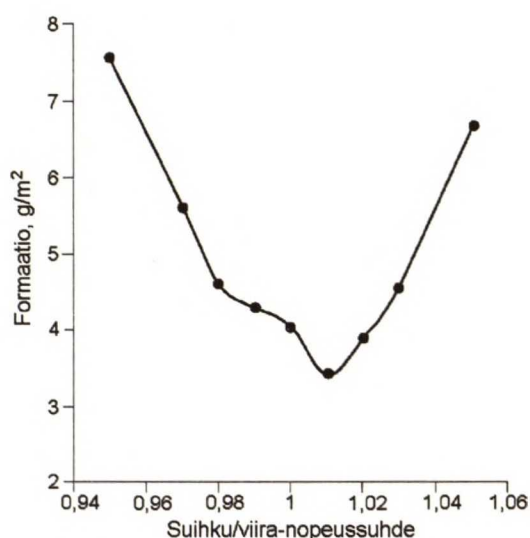
8.5 Suihku/viira-nopeussuhde

Pintakerroksen eli 3-perälaitikon hallintasuureiden vaikutusta ei pystytty luotettavasti havainnoimaan päällysteen vaikutuksen johdosta. Pintakerroksen optimaalisen suihku/viira-nopeussuhteen määrittäminen päätettiin sen vuoksi tehdä taustakerroksen tulosten perusteella, sillä perälaitikot ja viiraosat ovat identtiset eikä siten ole perusteltua epäillä kerrosten todellisuudessa poikkeavan toisistaan.

Tulosten tarkastelun perusteella päätettiin varsinaiseen koeajoon valita suihkusuhteiksi pinta- ja taustakerrokseen 1,015 ja runkokerrokseen 1,050. Viiran nopeuden ollessa

350 m/min vastaavat nämä arvot 5,25 m/min ja 17,5 m/min nopeuseroja. Nimenomaan suihkun ja viiran välinen nopeusero on formaatioon vaikuttava tekijä, ei itse suihku/viira-nopeussuhde. Kun optimaaliset nopeuserot tunnetaan, voidaan niitä vastaavat suihkusuhteet laskea myös kaikille muille ajonopeuksille.

Kuvassa 35 on esitetty suihku/viira-nopeussuhteen vaikutus formaatioon hybridiformerilla /36/. Vaste on myös tasoviiralla samankaltainen, joskin formaation kannalta suihkusuhteella on myös toinen optimiarvo hieman 1,0:llä pienemmällä arvolla. Mitä paksumpi muodostuva raina on, sitä kauempana arvosta 1,0 formaation kannalta optimaalinen suihkusuhteen arvo sijaitsee. Paksumpaan rainaan täytyy nimittäin synnyttää suurempia leikkausvoimia kuin ohuempaan rainaan vastaavan flokkien hajotuskyvyn saavuttamiseksi. Tällä voidaan perustella runko- ja taustakerroksen suihkusuhteiden erilaista käyttäytymistä (kuvat 29 ja 32). Kevyempi taustakerros oli koeajoon valituilla suihkusuhteilla jo ohittanut optimiarvonsa kun taas raskaampi runkokerros ei ollut vielä edes saavuttanut sitä.



Kuva 35. Suihku/viira-nopeussuhteen vaikutus formaatioon hybridiformerilla /36/.

Suihku/viira-nopeussuhteen käyttö viiraosan hallintaan on ongelmallista. Huulisuihkun nopeuden laskenta on useimmiten epätarkkaa. Koko käsitteen käyttö on hankalaa varsinkin eri nopeusalueilla toimivia paperikoneita vertailtaessa tai samallakin paperikoneella laajalla neliömassa-alueella toimittaessa. Käsite on kuitenkin sitkeästi vaikiintunut paperiteollisuuden käyttöön, vaikka viiran ja suihkun välinen nopeusero olisi paljon helpommin hahmotettavissa ja vertailtavissa.

8.6 Huuliaukko ja huuliero

Huuliaukon kohdalla optimiarvon määrittäminen on varsin helppoa. Suurempi huuliaukko antoi paremman formaation massasuspension sakeuden alenemisen kautta. Huuliero ei juurikaan vaikuta iskuetäisyyteen käytetyillä pienillä L/b -suhteilla $/61/$, mikä seurauksena huulieron vaikutus jäi varsin pieneksi.

Formaation kannalta optimaalinen L/b -suhde on pinta- ja taustakerroksessa 0,35 ja runkokerroksessa 0,22. Arvot on laskettu optimaalisiksi havaituista hallintasuureiden arvoista, jotka vastasivat pinta- ja taustakerroksessa 31,0 mm:n huuliaukkoa ja 11 mm:n huulieroja ja runkokerroksessa 49,0 mm:n huuliaukkoa ja 11 mm:n huulieroja. Näiden L/b -suhteiden avulla voidaan tulevaisuudessa koeajoissa määrittää optimaalinen huulieron arvo tunnetusta huuliaukon arvosta kertomalla huuliaukon arvo L/b -suhteella.

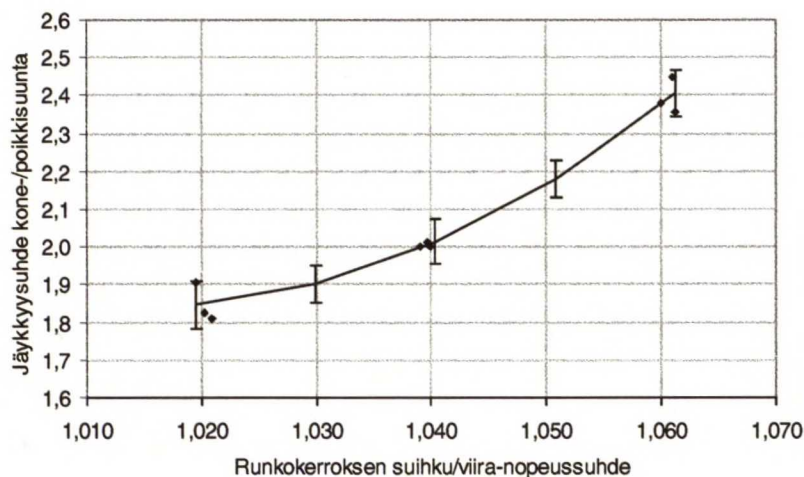
8.7 Vaikutus kartongin laatuominaisuuksiin

Tämän koeajon koepisteissä ei pintaominaisuuksia tarkasteltu kovinkaan laajasti. Formaation ja pintaominaisuuksien välistä yhteyttä tarkastellaan tarkemmin koeajoissa, joissa formaatiota parannettiin kuitukoostumusta ja suhteellisia kerrosneliömassoja muuttamalla. Myöskään retentiota tai vedenpoistoa ei koeajon aikana mitattu. Vedenpoisto ei kuitenkaan silmällä havaittavasti muuttunut hallintasuureiden muutosten johdosta. Myös vesiraja pysyi kohtuullisen vakiona ja tasaisena koko koeajon ajan kaikilla viiraosilla.

Liitteessä 3 esitetyt mittaustulokset on kerätty normaaleista käytöntarkkailun määrittämisistä ja prosessimittauksista. Kartongin laatuarvoista kiilto ei käytännössä muuttunut koeajon aikana. Myös paksuus, palstautumislujuus ja käyristymä pysyivät suunnilleen vakioina. Merkittävä muutos voitiin sen sijaan havaita jäykkyysuhteessa ja Bendtsen-sileydessä. PPS 10 -sileyks ei sen sijaan juurikaan korreloinut formaation kanssa. Pintapuolella muutokset olivat pieniä ja taustapuolen PPS-sileyks pysyi käytännössä samana koko koeajon ajan.

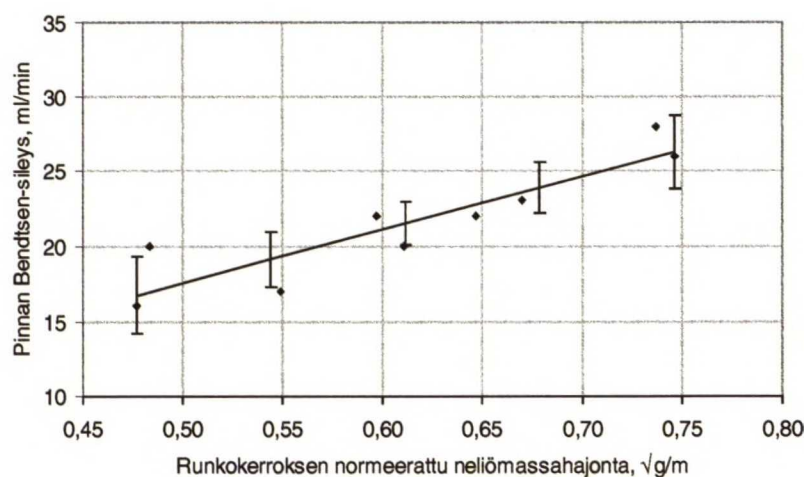
Suihkusuhteella tiedetään olevan vaikutusta myös kuitujen orientaatioon ja siten kartongin kone- ja poikkisuuntaisen jäykkyyden suhteeseen. Kuvassa 36 on esitetty runkokerroksen suihku/viira-nopeussuhteen vaikutus jäykkyysuhteeseen. Konesuuntaisen jäykkyyden havaittiin kasvavan selvästi suihkusuhteen ja siten kuitujen ko-

nesuuntaisen orientaation kasvaessa. Kannattaa huomioida, että koeajon aikana myös pinta- ja taustakerroksen suihkusuhteita kasvatettiin samanaikaisesti, sillä jäykkyys mitattiin koko kartongista eikä vain runkokerroksesta.

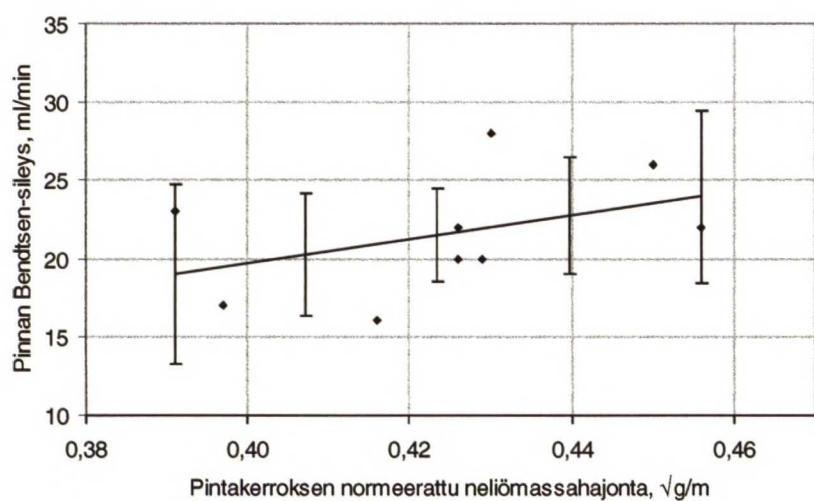


Kuva 36. Runkokerroksen suihku/viira-nopeussuhteen vaikutus jäykkyyssuhteeseen.

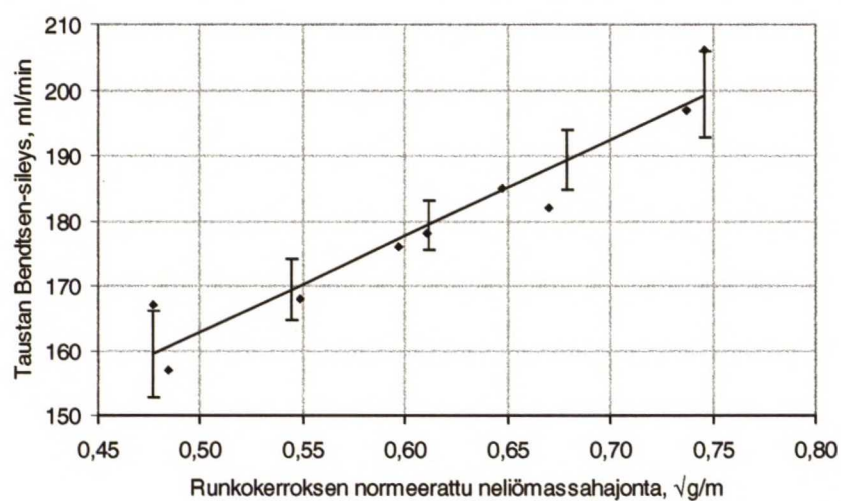
Koeajon aikana tuotetun kartongin Bendtsen-sileyys korreloi voimakkaasti rungon formaation kanssa. Lineaarinen regressiomalli antaa selityssasteeksi pintapuolella 81 % (kuva 37) ja taustapuolella 91 % (kuva 39). Vaikutus on merkittävä 95 % luottamustasolla. Pinta- (kuva 38, $R^2=0,18$) ja taustakerroksen (kuva 40, $R^2=0,17$) formaation vaikutus sileyteen oli varsin pieni, ja taustakerroksen korrelaatiokerroin on jopa negatiivinen. Taustakerroksen formaation huonontuessa taustan sileyys siis parani. Tämä selittyy sillä, että koeajon aikana runko- ja pintakerroksen formaation parantuessa taustakerroksen formaatio huononi. Havainto tukee käsitystä siitä, miten keskeinen merkitys rungon formaatiolla on koko kartongin ominaisuuksia ajatellen.



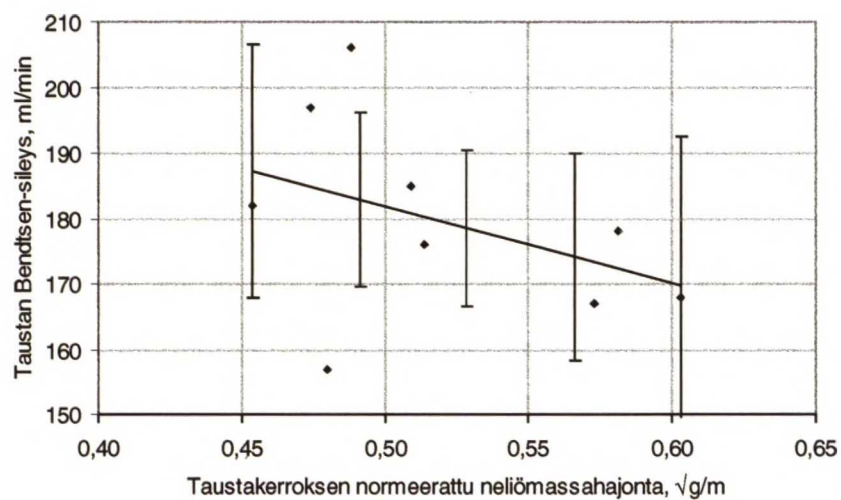
Kuva 37. Runkokerroksen formaation vaikutus pinnan Bendtsen-sileyteen.



Kuva 38. Pintakerroksen formaation vaikutus pinnan Bendtsen-sileyteen.



Kuva 39. Runkokerroksen formaation vaikutus taustan Bendtsen-sileyteen.



Kuva 40. Taustakerroksen formaation vaikutus taustan Bendtsen-sileyteen.

9 KOEAJOT FORMAATION PARANTAMISEKSI

9.1 Tavoitteet ja menetelmät

Formaation parantamiseen pyrittiin runkokerroksen lyhytkuituosuutta sekä pinta- ja taustaperälaatikon virtausmäärää kasvattamalla. Lyhytkuituosuutta kasvatettiin korvaamalla runkokerroksen valkaistu mäntysulfaatti valkaistulla koivusulfaatilla. Pinta- ja taustaperälaatikon virtausmäärää kasvatettiin pienentämällä runkokerroksen osuutta koko kartongin neliömassasta. Virtausmäärän kasvun uskottiin vaikuttavan suotuisasti formaatioon, sillä alunperin kaikki perälaatikot suunniteltiin samalla optimivirtaamalle, joka on 1160 l/s. Nykyisessä ajomallissa pinta- ja taustaperälaatikon virtausmäärät ovat kuitenkin selvästi alle 1000 l/s ja runkokerroksen virtausmäärä on puolestaan usein yli 1300 l/s. Virtausmäärän vaikutusta formaatioon päätettiin kokeilla, vaikka reikätelaperälaatikko ei olekaan yhtä herkkä virtausmäärien muutoksille kuin hydraulinen perälaatikko.

Koeajo suoritettiin kahdella eri neliömassalla, 7.12.2001 Ensocoat 230 g/m² -lajilla ja 12.12.2001 Ensocoat 275 g/m² -lajilla. Koesuunnitelmat (3³-faktorikoe ja lisäksi 1. koepisteen toisto lopuksi) on esitetty liitteessä 2. Runkokerroksen koivuosuus nostettiin aiemmalta tasolta 75 % tasolle 100 %. Runkokerroksen neliömassaosuus laskettiin tavanomaiselta tasolta 60 % tasolle 50 %. Koeajon aikana valmistettu kartonki meni normaalisti asiakastilaisuuksiin, joten mitään kovin suuria muutoksia ei voitu tehdä.

Ensocoat 230 g/m² -koeajon alussa tehdastietojärjestelmä vikaantui, minkä vuoksi koeajon alun prosessimittauksista tallennettu tieto on katkonaista. Koepisteet pystyttiin kuitenkin toteuttamaan halutulla tavalla. Ensocoat 275 g/m² -koeajo oli keskeytettävä kahden tunnin pesuseisokin ajaksi viidennen koepisteen jälkeen. Koeajoa jatkettiin koepisteestä kuusi alkaen siten, että kone pyrittiin ajamaan keskeytystä edeltäneisiin asetusarvoihin. Tässä onnistuttiinkin varsin hyvin. Päälystemäärä jäi tosin pesuseisokin jälkeen hieman alhaisemmaksi ja massojen jauhatusaste heilahteli hieman. Pesuseisokin vaikutuksesta voidaan olettaa loppupään koepisteiden 6-10 vertailukelpoisuuden heikenneen jonkin verran.

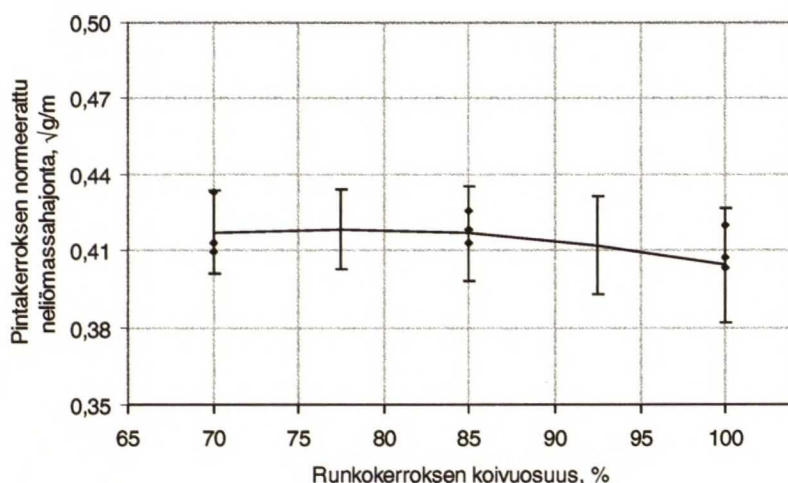
Koesuunnitelmien toinen faktori, runkokerroksen neliömassa, muunnettiin käytännössä pinta- ja taustakerroksessa perälaatikon virtausmääräksi ja runkokerroksessa pe-

rälaatikon sakeudeksi. Tämä muunnos toteutettiin pitämällä pinta- ja taustaperälaatikon sakeus ja runkoperälaatikon virtausmäärä vakiona koko koeajon ajan. Koeajoissa toteutuneet hallintasuureiden ja prosessimuuttujien arvot sekä laboratoriomittausten tulokset on esitetty liitteissä 4 ja 5.

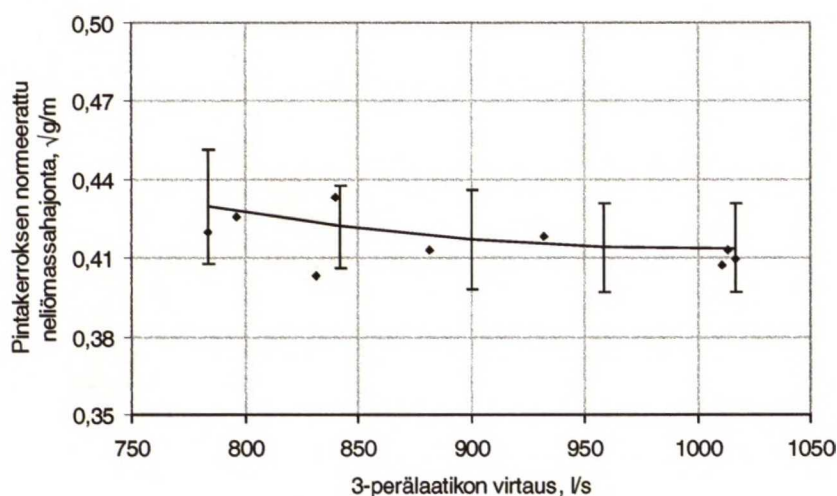
9.2 Pintakerros

Pintakerrokseen vaikuttava tekijä tässä koeajossa oli pintakerroksen neliömassan kasvu runkokerroksen neliömassan alentuessa. Pintakerroksen neliömassan kasvaessa kasvoi myös 3-perälaatikon virtausmäärä, sillä sakeus pyrittiin pitämään vakiona huuliaukkoa suurentamalla. Runkokerroksen koivuosuuden muutoksella oli kuitenkin epäsuora vaikutus myös pintakerroksen formaatioon, sillä koivuosuuden kasvaessa myös runkokerroksen formaatio parani, kuten seuraavassa kohdassa on esitetty. Runkokerroksen formaation parantuessa voidaan olettaa myös pintakerroksen päällystemäärän hajonnan pienenevän [39], mikä puolestaan vaikuttaa pintakerroksesta mitattuun formaatioon.

Faktorikokeen tuloksia (liite 4) analysoimalla saatiin Ensocoat 230 g/m² -lajilla toisen asteen regressiomallin selitysasteeksi 61 %. Kummankaan tekijän vaikutus normeerattuun neliömassahajontaan ei ollut merkittävä 95 % luottamustasolla. Koivuosuuden kasvaessa pintakerroksen formaatio parani jonkin verran (kuva 41), mikä tukee edellä esitettyä teoriaa. Myös 3-perälaatikon virtausmäärän kasvu paransi formaatiota, joskin hyvin vähän (kuva 42).



Kuva 41. Runkokerroksen koivuosuuden vaikutus pintakerroksen formaatioon (230 g/m²).



Kuva 42. 3-perälaatikon virtausmäärän vaikutus pintakerroksen formaation (230 g/m^2).

Liitteessä 5 esitettyjä Ensocoat 275 g/m^2 -koeajon tuloksia analysoimalla saatiin toisen asteen regressiomallin selitysasteeksi vain 5 %. Syytä selitysasteen alhaisuuteen ei pystytty toteamaan. Selitysaste on joka tapauksessa niin alhainen, ettei kyseisten tulosten tarkastelusta voida tehdä mitään johtopäätöksiä.

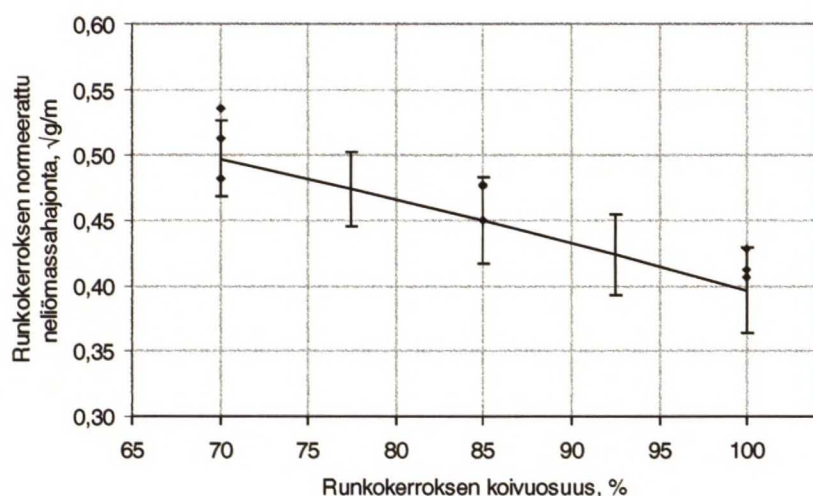
Muutokset normeeratussa neliömassahajonnassa olivat hyvin pieniä molemmissa koeajoissa. Normeerattu neliömassahajonta oli kaikissa koepisteissä hyvin lähellä keskiarvoa $0,42 \sqrt{\text{g/m}}$. Pintakerroksen formaatio olikin kerroksista ylivoimaisesti tasaisin. Tässä nähdään jälleen päällysteen tasoittava vaikutus samoin kuin edellä perälaatikoiden hallintasuureiden optimoimiseen tähdänneessä koeajossa.

Perälaatikon virtausmäärän kasvun vähäistä vaikutusta formaatioon voidaan selittää pintakerroksen viiraosan vedenpoiston riittämättömyydellä. Vesiraja siirtyi pintakerroksen neliömassan kasvaessa huolestuttavasti eteenpäin. Tehostamalla samanaikaisesti virtausmäärän kasvun kanssa vedenpoistoa ja säätämällä turbulenssitasoa päästölistojen määrää ja kulmia muuttamalla voitaisiin formaatiota parantaa tehokkaammin.

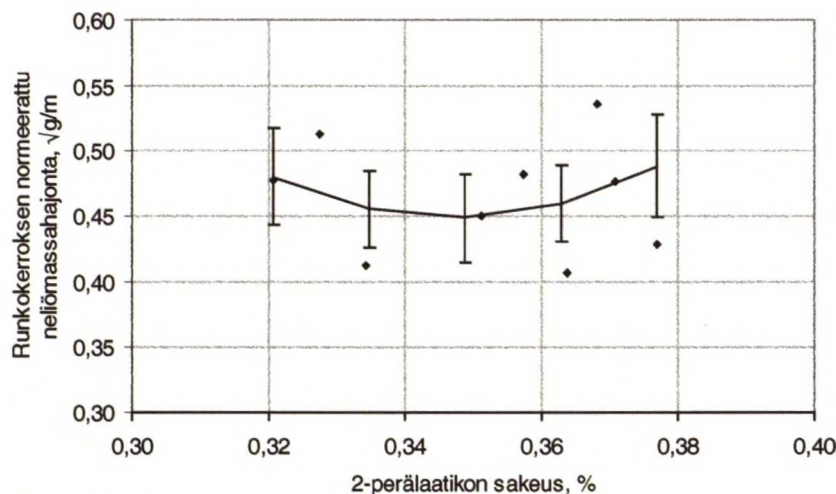
9.3 Runkokerros

Runkokerrokseen vaikuttavia tekijöitä tässä koeajossa olivat runkokerroksen koi-
vuosuus ja neliömassa. Koeajon aikana perälaatikon huuliaukko pidettiin vakiona, joten alhaisemmilla runkokerroksen neliöpainoilla 2-perälaatikon sakeus oli alempi. Faktorikokeen tuloksia analysoimalla saatiin Ensocoat 230 g/m^2 -lajilla toisen asteen

regressiomallin selityssasteeksi 94 %. Koivuosuuden vaikutus normeerattuun neliömassahajontaan oli merkittävä 95 % luottamustasolla (kuva 43). Yllättäen 2-perälaatikon sakeuden aleneminen ei vaikuttanut juurikaan formaatioon (kuva 44). Runkokerroksen viiraosan vedenpoistokin toimi moitteettomasti koko sakeusalueella, joten mitään hyvää selitystä tälle ilmiölle ei löytynyt. Paras formaatio saavutettiin joka tapauksessa keskitason sakeudella eli tässä tapauksessa hieman tavallista ohuemalla runkokerroksella.

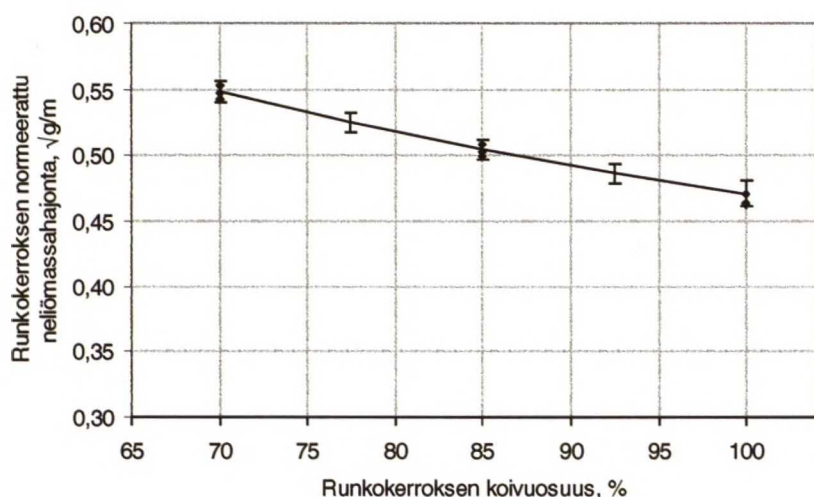


Kuva 43. Runkokerroksen koivuosuuden vaikutus runkokerroksen formaatioon (230 g/m^2).

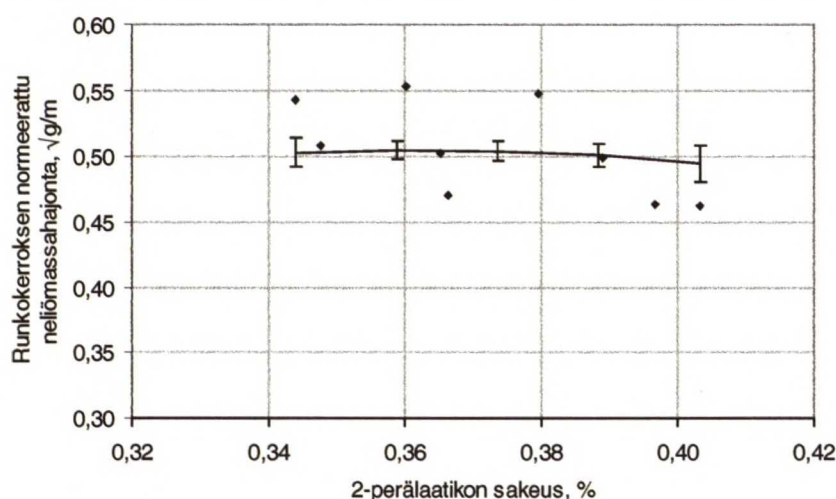


Kuva 44. 2-perälaatikon sakeuden vaikutus runkokerroksen formaatioon (230 g/m^2).

Ensocoat 275 g/m^2 -lajilla saatiin puolestaan toisen asteen regressiomallin selityssasteeksi 99 %. Koivuosuuden vaikutus normeerattuun neliömassahajontaan oli merkittävä 95 % luottamustasolla (kuva 45). Myöskään tässä tapauksessa 2-perälaatikon sakeuden aleneminen ei vaikuttanut juurikaan formaatioon (kuva 46).



Kuva 45. Runkokerroksen koivuosuuden vaikutus runkokerroksen formaatioon (275 g/m^2).



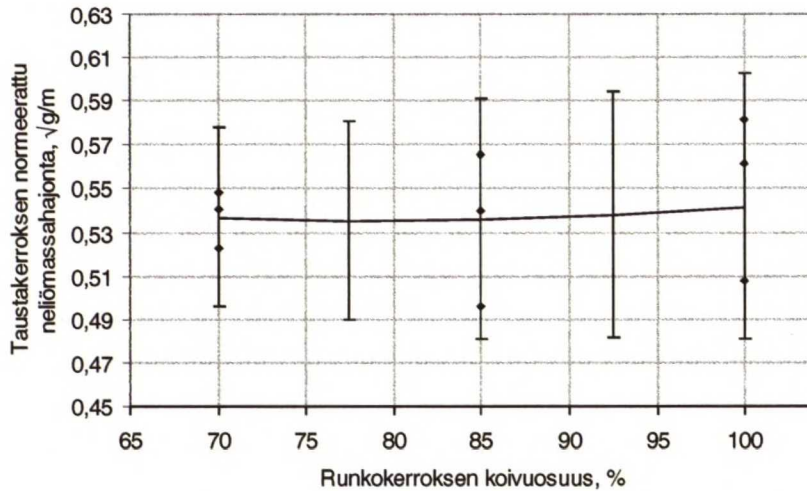
Kuva 46. 2-perälaatikon sakeuden vaikutus runkokerroksen formaatioon (275 g/m^2).

Runkokerroksen koivuosuutta kasvattamalla voitiin siis parantaa formaatiota huomattavasti. Tuloksiin sovitetun mallin avulla laskettuna formaatio parani 230 g/m^2 -lajilla 20 % ($0,496 \sqrt{g/m}$ (70 % koivua) ja $0,396 \sqrt{g/m}$ (100 % koivua)) ja 275 g/m^2 -lajilla 14 % ($0,549 \sqrt{g/m}$ (70 % koivua) ja $0,471 \sqrt{g/m}$ (100 % koivua)).

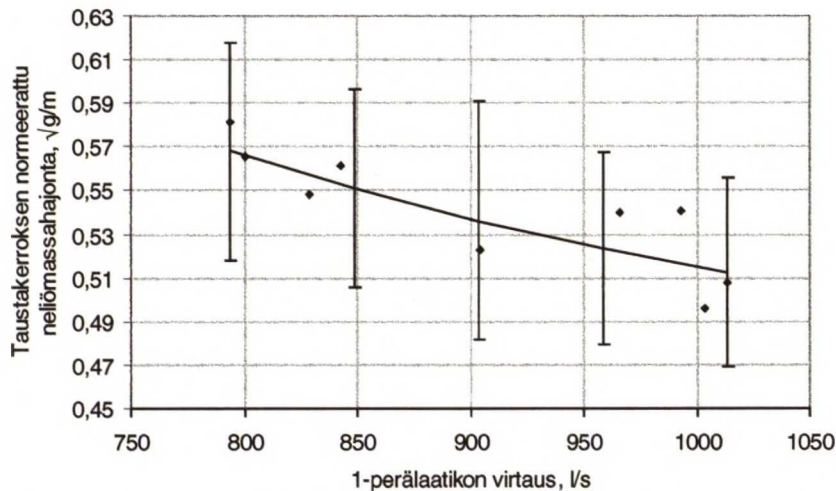
9.4 Taustakerros

Taustakerrokseen vaikuttava tekijä tässä koeajossa oli taustakerroksen neliömassan kasvu runkokerroksen neliömassan alentuessa. Taustakerroksen neliömassan kasvaessa kasvoi myös 1-perälaatikon virtausmäärä, sillä sakeus pyrittiin pitämään vakiona huuliaukkoa suurentamalla. Runkokerroksen koivuosuuden muutoksen ei pitäisi juuri-kaan vaikuttaa taustakerroksen formaatioon.

Faktorikokeen tuloksia analysoimalla saatiin Ensocoat 230 g/m² -lajilla toisen asteen regressiomallin selityssasteeksi 73 %. Kummankaan tekijän vaikutus ei ollut merkittävä 95 % luottamustasolla. Koivuosuudella ei ollut juuri mitään vaikutusta (kuva 47), mutta perälaatikon virtausmäärän kasvaminen näyttäisi parantavan taustakerroksen formaatiota (kuva 48).

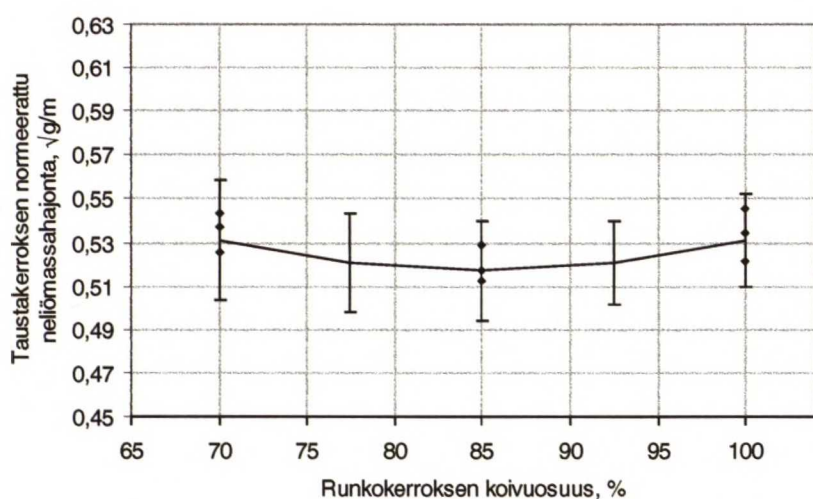


Kuva 47. Runkerroksen koivuosuuden vaikutus taustakerroksen formaatioon (230 g/m²).

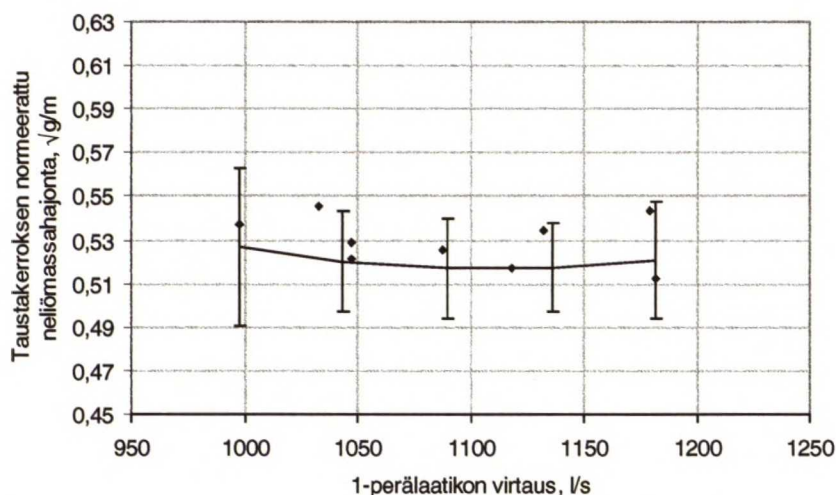


Kuva 48. 1-perälaatikon virtausmäärän vaikutus taustakerroksen formaatioon (230 g/m²).

Ensocoat 275 g/m² -lajilla saatiin puolestaan toisen asteen regressiomallin selityssasteeksi 49 %. Kummankaan tekijän vaikutus ei ollut merkitsevä 95 % luottamustasolla. Kuvassa 49 esitetty runkerroksen koivuosuuden vaikutus formaatioon oli vähäinen, samoin kuin kuvassa 50 esitetty perälaatikon virtausmäärän vaikutus. Tämän koeajon perusteella ei voida sanoa juuri mitään perälaatikon virtausmäärän vaikutuksesta formaatioon.



Kuva 49. Runkokerroksen koivuosuuden vaikutus taustakerroksen formaatioon (275 g/m^2).



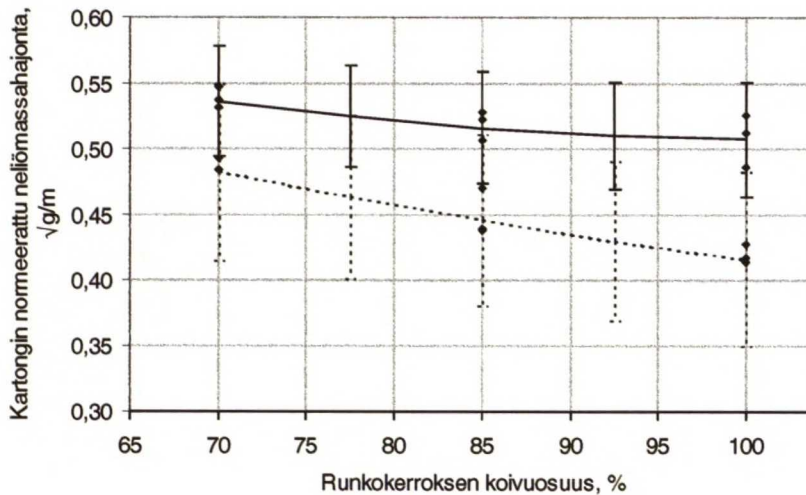
Kuva 50. 1-perälaatikon virtausmäärän vaikutus taustakerroksen formaatioon (275 g/m^2).

Ensocoat 230 g/m^2 -koeajon perusteella näyttäisi kuitenkin siltä, että perälaatikon virtausta kasvattamalla voitaisiin hieman parantaa formaatiota. Kysymyksessä olisi kuitenkin korkeintaan 10 % parannus ($0,568 \sqrt{g/m}$ (794 l/s) ja $0,512 \sqrt{g/m}$ (1014 l/s)), eikä sitäkään voitu havaita Ensocoat 275 g/m^2 -lajilla.

9.5 Runkokerroksen lyhytkuituus

Runkokerroksen lyhytkuituus osoittautui erittäin merkittäväksi runkokerroksen formaatioon vaikuttavaksi tekijäksi (kuvat 43 ja 45). Runkokerroksen koivuosuuden vaikutus myös koko kartongin normeerattuun neliömassahajontaan oli huomattava. Toisen asteen regressiomallin selitysaste oli Ensocoat 230 g/m^2 -koeajossa 94 % ja En-

socoat 275 g/m² -koeajossa 66 % (kuva 51). Molemmissa tapauksissa vaikutus oli merkittävä 95 % luottamustasolla. Koivuosuuden vaikutus koko kartongin formaatioon oli suurempi kevyemmällä kuin raskaammalla neliömassalla. Tätä ei kuitenkaan voida pitää yleispätevänä sääntönä vaan lähinnä osoituksena siitä, etteivät koeajot toteutuneet täysin samanlaisina suunnitelmista huolimatta.



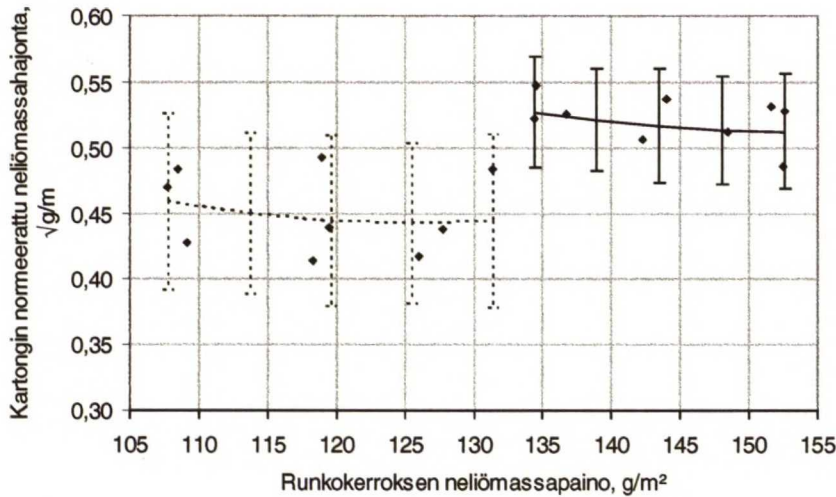
Kuva 51. Runkokerroksen koivuosuuden vaikutus koko kartongin formaatioon (230 g/m², katkoviiva ja 275 g/m², yhtenäinen viiva).

Tuloksiin sovitetun mallin mukaan laskettu formaation parantuminen oli 230 g/m²-lajilla 14 % (0,480 √g/m (70 % koivua) ja 0,414 √g/m (100 % koivua)) ja 275 g/m²-lajilla 5 % (0,533 √g/m (70 % koivua) ja 0,504 √g/m (100 % koivua)).

9.6 Runkokerroksen neliömassa

Runkokerroksen neliömassan vaikutus koko kartongin formaatioon oli suhteellisen pieni. Koko kartonkia tarkasteltaessa runkokerroksen neliömassaosuuden kasvu paransi formaatiota. Tämä ei kuitenkaan sinällään osoittanut vääräksi sitä olettamusta, että pinta- ja taustakerroksen formaatiota voitaisiin parantaa perälaatikkojen virtausmäärää kasvattamalla, vaan osoitti sen, miten hallitseva vaikutus runkokerroksen formaatiolla on koko kartongin formaatioon. Liitteissä 4 ja 5 esitetyistä formaation mittatuloksista voidaan havaita, että 100 % runkokerroksen koivuosuudella runkokerroksen formaatio oli molemmissa koeajoissa parempi kuin taustakerroksen formaatio. Näin ollen suurempi osa kartongin kokonaisneliöpainosta kannattaisi valmistaa runkokerroksen viiraosalla, jossa formerin ja lyhytkuituisen massan ansiosta on saavutettavissa paras formaatiotaso.

Kuvassa 52 on esitetty runkokerroksen neliömassan vaikutus koko kartongin normeerattuun neliömassahajontaan. Vaikutus oli varsin pieni etenkin verrattuna koivuusuuden vaikutukseen.



Kuva 52. Runkokerroksen neliömassan vaikutus koko kartongin formaatioon (230 g/m², katkoviiva ja 275 g/m², yhtenäinen viiva).

Yhteenvetona kerrosneliöpainojen muuttamisesta voidaan todeta, ettei sillä ole saavutettavissa suurta hyötyä. Pinta- ja taustakerroksen perälaatikoiden virtausmäärien kasvun ei havaittu juuri parantavan formaatiota. Kivirantakin totesi suorittamiensa koeajojen perusteella /26/, ettei reikätelaperälaatikon sisäinen nopeus vaikuttanut formaatioon vakiosakeudella ajettaessa. Tilanne olisi luonnollisesti toinen, jos pinta- ja taustakerrosten alentunut neliömassa hyödynnettäisiin alentamalla myös perälaatikoiden sakeutta.

9.7 Vaikutus kartongin pintaominaisuuksiin

9.7.1 Formaatio ja pintaominaisuudet

Normeeratun neliömassahajonnan vaikutusta kartongin pintaominaisuuksiin tarkasteltiin Ensocoat 230 g/m² ja 275 g/m² -koeajojen tuloksia analysoimalla. Tässä tarkasteltuja pintaominaisuuksia ovat Bendtsen- ja PPS 10 -sileydet, painetun pinnan visuaalinen laatu ja painojäljen laikullisuus, päällysteen peittävyys (polttopeittävyys), kartongin pinnan sileys painonipissä (prescale), kartongin profiilin aritmeettinen poikkeama (profilometri, vain Ensocoat 230 g/m² -koeajosta) sekä kartongin vedenabsorptiokyky lyhyellä aikavälillä (Bristow).

Koepisteissä mitatut ja määritetyt kartongin pintaominaisuudet on esitetty liitteissä 4 ja 5. Määritysmenetelmien kuvaukset on esitetty liitteessä 1. Kartongista mitattujen normeeraattujen neliömassahajontojen lineaariset korrelaatiokertoimet on esitetty taulukoissa 9 ja 10. Korrelaatiokertoimet ovat pieniä ja lisäksi ristiriitaisia näiden kahden koeajon välillä.

Taulukko 9. Normeeratun neliömassahajonnan vaikutus kartongin pintaominaisuuksiin (230 g/m²).

Lineaarinen korrelaatiokerroin	Sileys pinta	Sileys tausta	PPS pinta	PPS tausta	Painojälki pinta	Mottling	Polttopeittävyys	Pre-scale	Flokki-koko x	Flokki-koko y	Bristow 4 s	Bristow 2 s	Bristow 1,3 s
Norm. formaatio	-0,38	0,27	-0,79*	0,12	-0,04	0,12	0,33	-0,48	0,43	0,45	-0,55	0,64	-0,33
Pinnan norm. formaatio	0,34	x	-0,45	x	0,02	0,47	0,16	-0,20	-0,03	0,01	0,27	0,24	0,40
Rungon norm. formaatio	-0,21	0,41	-0,80*	-0,25	-0,28	0,28	0,42	-0,40	0,23	0,25	-0,39	0,75*	-0,13
Taustan norm. formaatio	x	0,40	x	-0,35	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Lineaarinen korrelaatiokerroin	Profilometri pinta (10 mm)	Profilometri pinta (3 mm)	Profilometri pinta (1 mm)	Profilometri pinta (0,1 mm)	Profilometri tausta (10 mm)	Profilometri tausta (3 mm)	Profilometri tausta (1 mm)	Profilometri tausta (0,1 mm)
Norm. formaatio	0,10	0,24	-0,10	-0,37	-0,54	-0,34	-0,14	-0,61
Pinnan norm. formaatio	0,04	0,08	-0,40	-0,54	x	x	x	x
Rungon norm. formaatio	0,01	0,00	-0,34	-0,46	-0,55	-0,59	-0,34	-0,65
Taustan norm. formaatio	x	x	x	x	0,68	-0,01	-0,12	0,39

*) lineaarinen korrelaatio merkittävä 95 % luottamusvälillä

x) jätetty merkittämättä selvyiden vuoksi (taustan formaatio vs. pinnan ominaisuudet ja pinnan formaatio vs. taustan ominaisuudet)

Taulukko 10. Normeeratun neliömassahajonnan vaikutus kartongin pintaominaisuuksiin (275 g/m²).

Lineaarinen korrelaatiokerroin	Sileys pinta	Sileys tausta	PPS pinta	PPS tausta	Painojälki pinta	Mottling	Polttopeittävyys	Pre-scale	Flokki-koko x	Flokki-koko y	Bristow 4 s	Bristow 2 s	Bristow 1,3 s
Norm. formaatio	0,85*	0,35	0,24	0,55	0,15	0,16	0,00	-0,20	0,49	0,48	0,47	0,44	-0,10
Pinnan norm. formaatio	0,33	x	0,17	x	0,02	-0,39	0,09	0,17	-0,08	-0,11	0,81*	-0,06	-0,53
Rungon norm. formaatio	0,53	0,05	0,01	0,71*	0,39	0,44	-0,01	-0,50	0,72*	0,72*	0,02	0,11	-0,09
Taustan norm. formaatio	x	0,11	x	0,24	x	x	x	x	x	x	x	x	x

*) lineaarinen korrelaatio merkittävä 95 % luottamusvälillä

x) jätetty merkittämättä selvyiden vuoksi

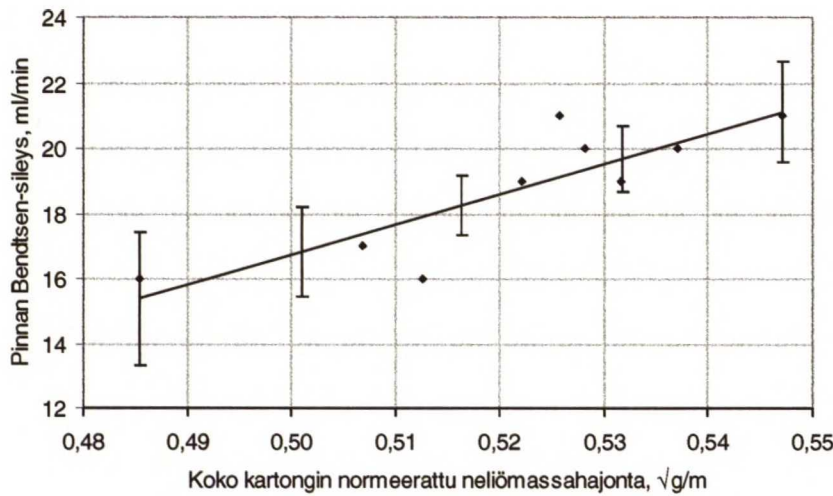
Mitään selviä johtopäätöksiä formaation vaikutuksesta pintaominaisuuksiin ei yllä esitettyjen korrelaatiokertoimien johdosta voida tehdä. Näytteiden väliset erot olivat loppujen lopuksi hyvin pieniä. Seuraavassa on kuitenkin tarkasteltu tämän työn kannalta kiinnostavimpia ominaisuuksia.

9.7.2 Sileys

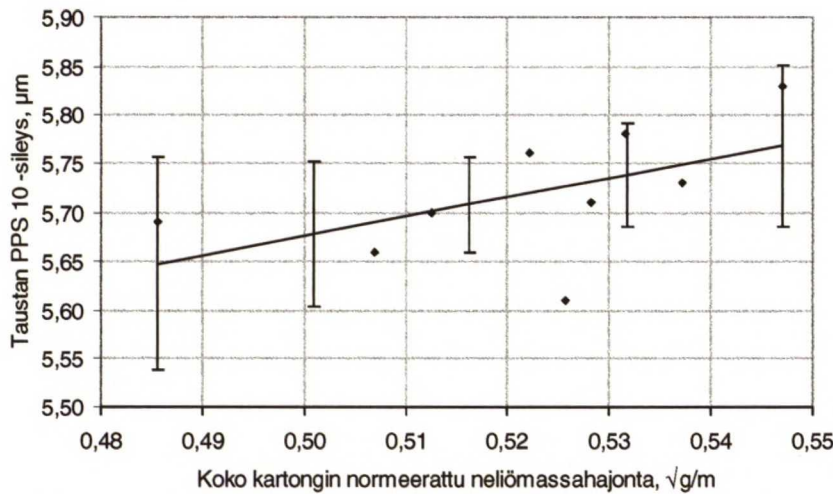
Ensocoat 230 g/m² -koeajossa normeeratun neliömassahajonnan vaikutus Bendtsen- ja PPS 10 -sileyteen oli ristiriitainen. Taustapuolen Bendtsen-sileys näytti paranevan

hieman formaation parantuessa. Pinnan PPS 10 -sileys sen sijaan heikkeni merkittävästi formaation parantuessa. Formaation vaikutus sileysarvoihin jäi tässä koeajossa ilmeisesti niin pieneksi, että se peittyi sileyksien satunnaisvaihtelun alle.

Ensocoat 275 g/m² -koeajossa normeeratun neliömassahajonnan parantuminen paransi kartongin Bendtsen- ja PPS 10 -sileyksiä. Kaikki korrelaatiokertoimet olivat positiivisia. Normeerattu neliömassahajonta vaikutti selvästi pinnan Bendtsen-sileyteen (kuva 53, R²=0,73, merkittävä 95 % luottamustasolla) ja taustan PPS 10 -sileyteen (kuva 54, R²=0,30).



Kuva 53. Kartongin normeeratun neliömassahajonnan vaikutus pinnan Bendtsen-sileyteen (275 g/m²).



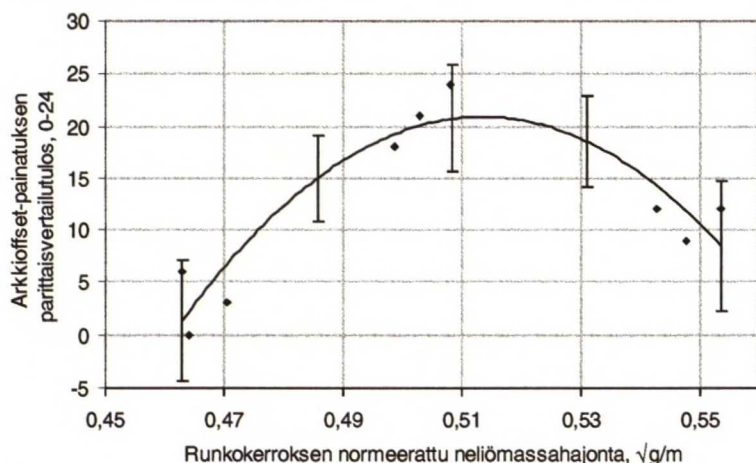
Kuva 54. Kartongin normeeratun neliömassahajonnan vaikutus taustan PPS 10 -sileyteen (275 g/m²).

Ensocoat 275 g/m² -koeajon tulosten perusteella voitiin siis todeta formaation vaikut-
tavan kartongin pinnan ja taustan sileyteen. Jostain syystä kevyemmällä neliöpainolla
tätä vaikutusta ei voitu havaita, vaan tulokset jäivät ristiriitaisiksi. Tarkempaa syytä
koeajojen väliseen eroavaisuuteen ei löydetty.

9.7.3 Painojäljen visuaalinen arviointi

Painojäljen visuaalisen arvioinnin suorittivat kolme testipainon työntekijää parittais-
vertailumenetelmää käyttäen (liite 1). Alustavassa tarkastelussa kaikki koepisteet sai-
vat arvosanakseen 2 asteikolla 1-5 eli näytteet edustivat erittäin hyvää tasoa. Näyt-
teitä ei pystytty laittamaan paremmuusjärjestykseen muuten kuin parittaisvertailun
avulla. Päälysteen vaikutus painojäljen visuaaliseen laatuun näyttää olevan huomattavasti
suurempi kuin formaation vaikutus, niin samanlaisia painetut pinnat olivat.

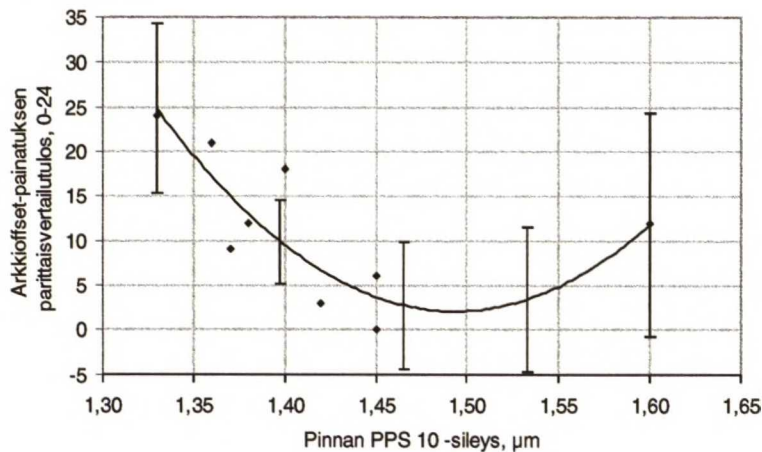
Ensocoat 230 g/m² -lajilla formaation vaikutus painojäljen visuaaliseen arvostelutulok-
seen oli lähes olematon. Sen sijaan Ensocoat 275 g/m² -lajilla runkokerroksen for-
maation ja painojäljen visuaalisen arvioinnin tuloksiin sovitettu toisen asteen regres-
siomalli antoi selitysasteeksi 85 %. Tämä vaikutus oli merkittävä 95 % luottamusta-
solla. Mallin kuvaaja on kuitenkin alaspäin aukeava paraabeli (kuva 55), mikä synnyt-
tää epäilyksiä tämän vaikutuksen oikeellisuudesta.



Kuva 55. Runkokerroksen normeeratun neliömassahajonnan vaikutus painojäljen visuaaliseen arvioon (275 g/m²).

Syytä kuvassa 55 näkyvään käytökseen voidaan hakea pinnan PPS 10 -sileyden vaihtelusta. Jostain syystä koeajon keskivaiheilla PPS-sileys oli parempi kuin alussa tai lopussa. Sileyden vaihtelua ei pystytty selittämään millään tekijällä. PPS 10 -sileys vaikuttaa kuitenkin merkittävästi painojäljen antamaan visuaaliseen vaikutelmaan,

kuten kuvasta 56 voidaan nähdä (mallin selitysaste 70 %, merkittävä 95 % luottamustasolla).

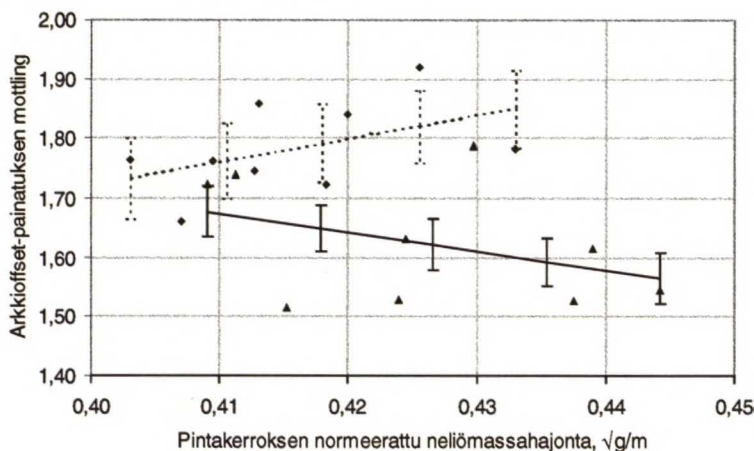


Kuva 56. Pinnan PPS 10 -sileyden vaikutus painojäljen visuaaliseen arvioon (275 g/m^2).

Formaation vaikutus painojäljen visuaaliseen vaikutelmaan jäi siis näiden tulosten valossa epäselväksi. Vaikutus peittyi koeajoissa muiden muuttujien, varsinkin pinnan PPS-sileyden vaihtelun alle. Koeajoissa havaittiin lisäksi PPS-sileyden huononevan koeajojen loppua kohti, mikä johtuu todennäköisesti päällystysterien kulumisesta.

9.7.4 Painojäljen laikullisuus (mottling)

Ensocoat 230 g/m^2 -lajilla pintakerroksen formaation parantuessa laikullisuus väheni mutta Ensocoat 275 g/m^2 -lajilla vaikutus oli päinvastainen (kuva 57). Koko kartongista mitatun formaation korrelaatio laikullisuuden kanssa oli vähäistä mutta silti positiivista. Myös runkokerroksen formaation ja laikullisuuden välinen korrelaatiokerroin oli molemmissa koeajoissa positiivinen.



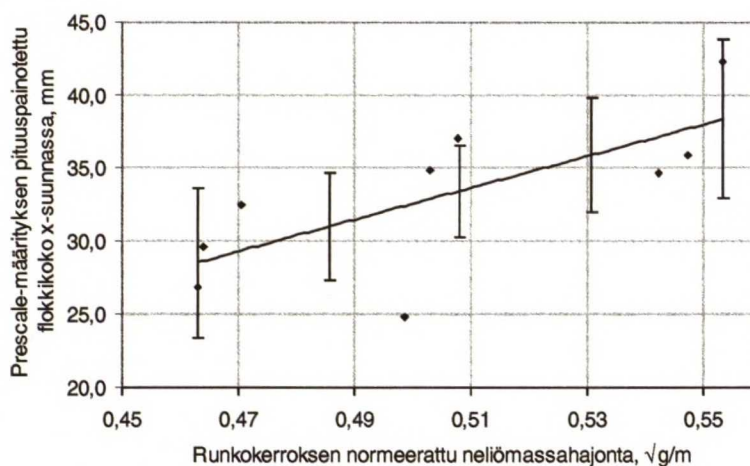
Kuva 57. Pintakerroksen normeeratun neliömassahajonnin vaikutus painojäljen laikullisuuteen (230 g/m^2 , katkoviiva ja 275 g/m^2 , yhtenäinen viiva).

Tulosten perusteella vaikuttaisi siltä, että formaation paraneminen pienentää painojäljen laikullisuutta. Vaikutus on vähäinen, mutta kuitenkin selvästi olemassa. Suuremmilla koepisteiden välisillä formaatioeroilla vaikutus saataisiin varmaankin paremmin esille.

9.7.5 Muut pintaominaisuudet

Taulukoissa 9 ja 10 esitettyjä formaation ja pintaominaisuuksien välisiä korrelaatiokertoimia ja liitteissä 4 ja 5 esitettyjä tuloksia tarkastelemalla voidaan todeta, että formaation vaikutus kartongin pinnan lyhyen aikavälin absorptiokykyyn (Bristow) oli ristiriitainen. Myöskään itse mittaustulosten lukuarvoissa ei esiintynyt merkittävää vaihtelua. Tilanne oli lähes sama myös prescale- ja polttopeittävyysmäärittämissä. Yhteistä näille kaikille määrittämisille onkin se, että niiden tulos vaikuttaa riippuvan paljon enemmän itse päällysteestä kuin pohjakartongin formaatiosta.

Poikkeuksen tässä ryhmässä muodosti kuitenkin flokkikoko. Prescale-määrittämissä normeeratun neliömassahajonnan pieneneminen pienensi myös pituuspainotettua flokkikokoa molemmissa koeajoissa. Ensocoat 275 g/m² -lajilla runkokerroksen formaation vaikutus flokkikokoon oli merkittävä 95 % luottamustasolla (kuva 58, lineaarisen mallin selitysaste 52 %). Tämä onkin hyvin loogista, sillä formaatiota parannettiin ennen kaikkea koivuosuutta kasvattamalla. Lyhyet koivukuidut muodostavat pienempiä flokkeja.



Kuva 58. Runkokerroksen normeeratun neliömassahajonnan vaikutus flokkikokoon (275 g/m²).

Polttopeittävyysmenetelmällä voidaan tutkia päällysteen peittävyttä (liite 1). Näytteitä tarkasteltiin myös elektronimikroskoopilla, mutta näytteistä ei juuri voinut päätellä

muuta kuin sen, että päällysteen peittävyys oli kaikissa koepisteissä erittäin hyvä. Näin on helposti ymmärrettävissä myös se, ettei polttopeittävyttä tutkimalla voitu havaita suuria eroja näytteiden välillä. Visuaalisesti polttopeittävyysnäytteitä katsottaessa koepisteiden välillä ei voitu havaita eroja. Kuva-analyysin avulla vaihtelu voitiin mitata, mutta kuten edellä todettiin, jäivät korrelaatiokertoimet pieniksi.

Profilometrimittauksella voidaan tarkastella kartongin pintaprofiilin poikkeamaa ideaalistasosta. Profiilin aritmeettinen poikkeama määritettiin vain Ensocoat 230 g/m²-koeajon koepisteistä. Kartongin pintapuolella korrelaatiokertoimet olivat pieniä kaikilla mittauksen katkaisurajoilla. Taustapuolella korrelaatiokertoimet olivat suurempia, mutta ne vaihtelivat vahvasti positiivisesta vahvasti negatiiviseen mittauksen katkaisurajasta riippuen. Satunnaisvaihtelu näyttää siis tässäkin tapauksessa peittäneen vasten alleen.

9.8 Lyhytkuituosuuden kasvattamisen taloudelliset vaikutukset

Korvaamalla runkokerroksen valkaistu havusellu valkaistulla koivusellulla voidaan saavuttaa myös kustannussäästöjä formaation paranemisen lisäksi. Saavutettava kustannussäästö tuotettua tonnia kohti voidaan laskea, kun tiedetään, että runkokerroksen osuus koko kartongin neliömassasta on tavallisesti 60 %. Tästä 70 % on neitseellistä massaa, josta puolestaan 30 % oli aikaisemmin valkaistua mäntysellua. Kun mänty korvataan koivulla säästyy raaka-ainekustannuksia 6,2 €/t (korvatun männyn määrä on siis 0,6 x 0,7 x 0,3 t/t eli 126 kg/t). Laskennassa lisäksi tarvittavat valkaistun sellun hintatiedot on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Valkaistun sellun hintatiedot /92/.

Raaka-ainekustannus (FOEX PIX 02.04.2002)	Hinta USD/t	Hinta EUR/t
Valkaistu mäntysellu (NBSK)	433,71	498,19
Valkaistu koivusellu (BHKP)	390,92	449,04

10 PÄÄLLYSTÄMÄTÖN KOEAJO

10.1 Tavoitteet ja menetelmät

Tämän koeajon tavoitteena oli tarkastella formaation vaikutusta päällystämättömän kartongin pintaominaisuuksiin. Aiemmissa koeajoissa havaittiin päällysteen peittävän tehokkaasti alleen pohjakartongin formaation vaikutukset. Aiemmat koeajot olivat myös ajallisesti varsin pitkiä. Lyhyemmällä, alle tunnin mittaisella koeajolla voitiin satunnaisvaihtelun määrää pienentää ja siten kasvattaa vasteen suhteellista osuutta.

Koeajon keskeisenä ajatuksena oli parantaa pinta- ja taustakerroksen formaatiota perälaatikoiden sakeutta alentamalla. Runkokerroksen sakeus pidettiin koko koeajon ajan vakiona. Koeajon aikana kartonkia ei liimattu liimapuristimella, sitä ei myöskään päällystetty tai soft-kalanteroitu. Päällystämätön kartonki konekalanterointiin kuitenkin vakiopaksuuteen.

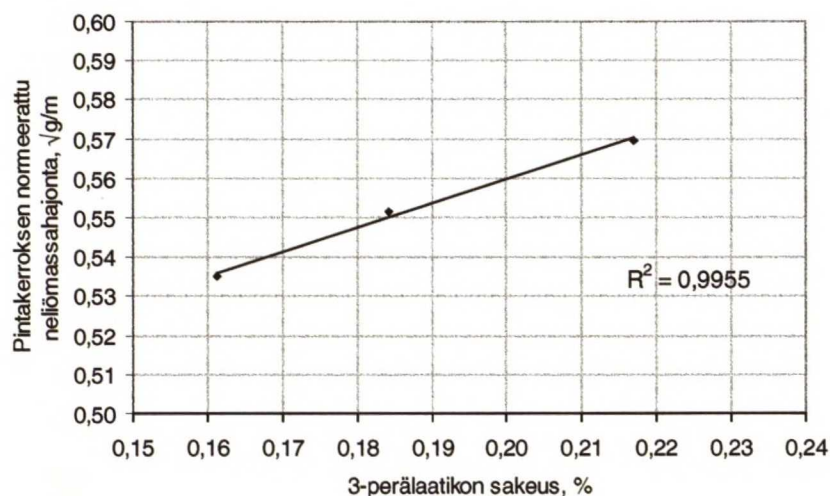
Koeajo suoritettiin 14.2.2002. Koeajosuunnitelma (kolme koepistettä) on esitetty liitteessä 2. Pinta- ja taustaperälaatikoiden tavoitesakeuksiksi koepisteisiin valittiin 0,22, 0,19 ja 0,16 %. Koeajon päätteeksi päätettiin vielä päällystää koepiste kolmen pohjakartonki, jotta nähtäisiin, millaiseen lopputulokseen kyseisillä asetuksilla voidaan päästä. Pidempään koeajoon ei valitettavasti ollut mahdollisuutta tuotantoteknisten tekijöiden vuoksi, joten tulosten luotettavuuden arviointia ei käytännössä voida suorittaa.

Koepisteissä toteutuneet hallintasuureiden arvot, saadut mittaustulokset ja koeajolosuhteet on esitetty liitteessä 6. Formaatio mitattiin Ambertecin Beta Formation Tester -laitteella sekä koko kartongista että kaikista kerroksista erikseen. Tulokset analysoitiin Statistica-ohjelmalla tarkastelemalla lineaarisia korrelaatiota.

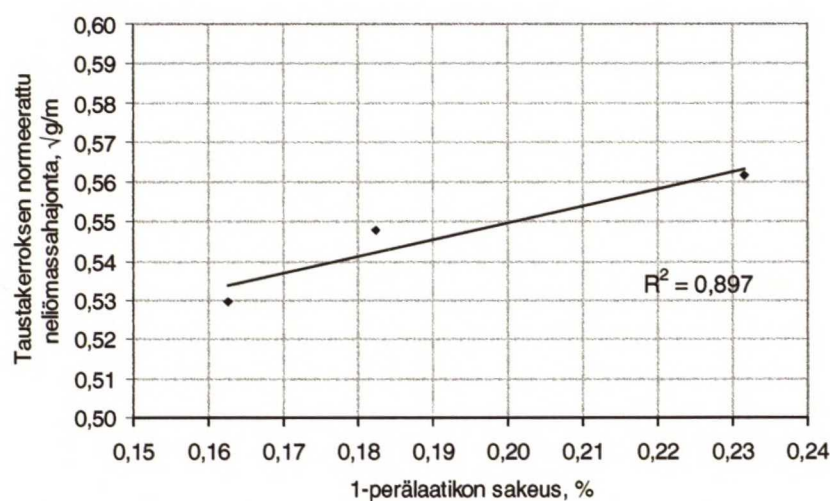
10.2 Tulosten tarkastelu

Kuvissa 59 ja 60 on esitetty pinta- ja taustakerroksen normeeratun neliömassahajonnan riippuvuus perälaatikon sakeudesta. Lineaariset korrelaatiot ovat erittäin hyviä. Kuvista nähdään, miten perälaatikkosakeudella voitiin tehokkaasti vaikuttaa formaatioon. Taustakerroksen formaation havaittiin myös olevan pintakerroksen formaatiota paremmalla tasolla. Aiemmissa päällystetyissä koeajoissa pintakerroksen formaatio oli

jatkuvasti hyvin tasaista ja huomattavasti paremmalla tasolla kuin taustakerroksen formaatio. Tässäkin voidaan siis havaita päällysteen normeerattua neliömassahajontaa parantava vaikutus.



Kuva 59. Perälaatikon sakeuden vaikutus formaatioon pintakerroksessa.



Kuva 60. Perälaatikon sakeuden vaikutus formaatioon taustakerroksessa.

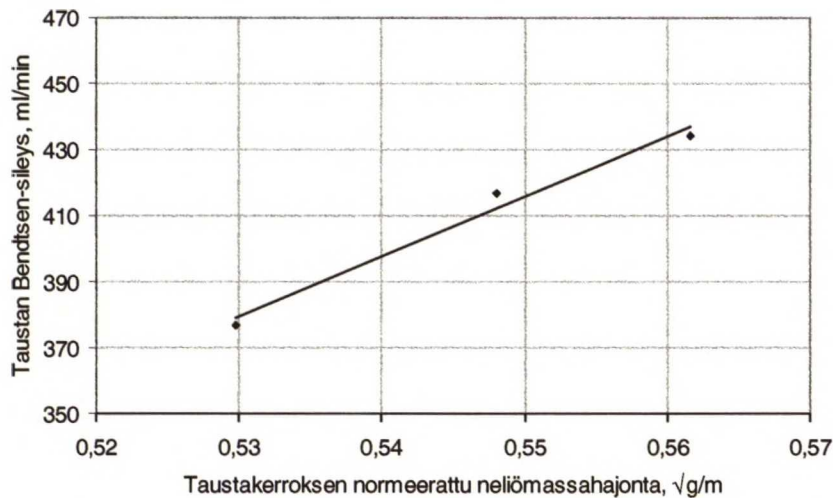
Taulukossa 12 on esitetty normeeratun neliömassahajonnan ja pintaominaisuuksien väliset lineaariset korrelaatiokertoimet. Koepisteiden pienen määrän vuoksi korrelaatiokertoimet ovat hyvin korkeita.

Taulukko 12. Normeeratun neliömassahajonnan vaikutus kartongin pintaominaisuuksiin päälystämättömässä koeajossa.

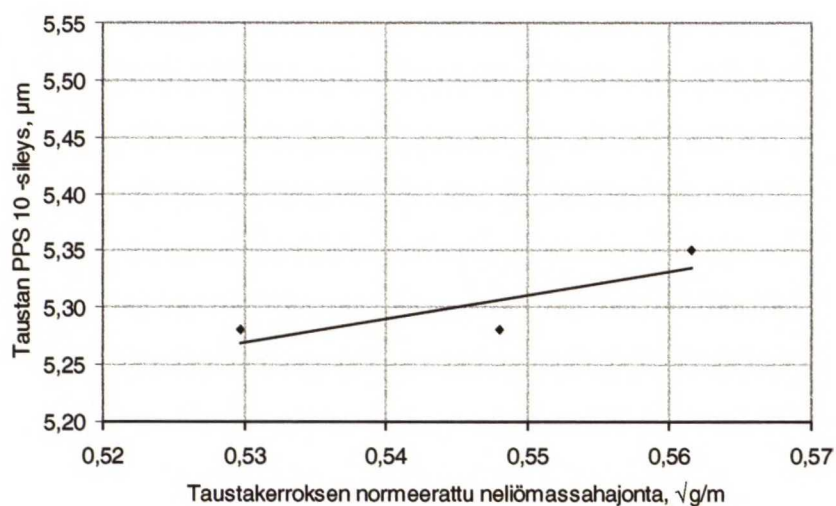
Lineaarinen korrelaatiokerroin	Sileys pinta	Sileys tausta	PPS pinta	PPS tausta	Brist ow 4 s	Brist ow 2 s	Brist ow 1,3 s	Cobb pinta	Cobb tausta	Profi-lometri 10 mm	Profi-lometri 3 mm	Profi-lometri 1 mm	Profi-lometri 0,1 mm
Norm. formaatio	0,84	0,98	0,56	0,86	0,01	-0,86	-0,10	0,86	0,94	1,00	0,44	0,31	1,00
Pinnan norm. formaatio	0,82	x	0,60	x	-0,03	-0,88	-0,14	0,88	x	1,00	0,40	0,27	1,00
Taustan norm. formaatio	x	0,99	x	0,82	x	x	x	x	0,91	x	x	x	x

x) jätetty merkitsemättä selvyiden vuoksi

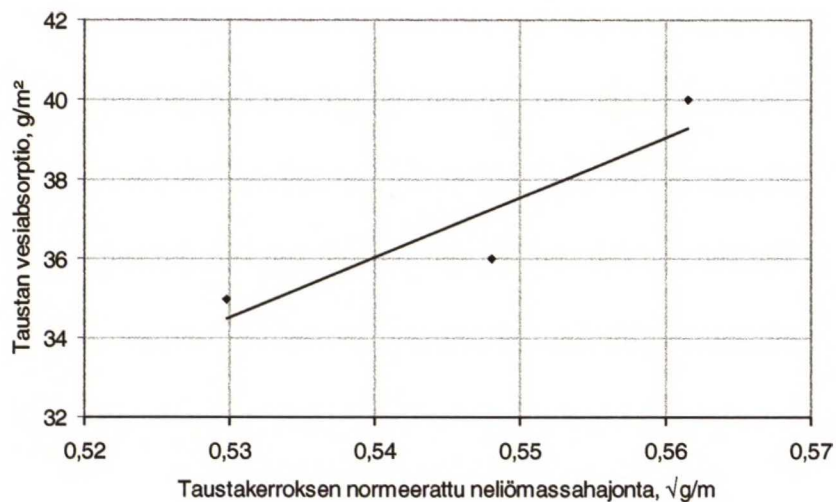
Pinnan ja taustan Bendtsen- ja PPS-sileydet korreloivat hyvin formaation kanssa, Bendtsen-sileys PPS-sileyttä ja taustapuolen arvot pintapuolen arvoja paremmin (kuvat 61 ja 62). Formaation vaikutus kartongin pinnan lyhyen aikavälin absorptiokykyyn (Bristow) oli jälleen vähäinen. Tulokset (liite 6) olivat käytännössä samoja kaikissa koepisteissä. Pidemmän aikavälin mittauksella eli 2 minuutin Cobb-testillä vedenabsorptiokyky näyttäisi pienenevän formaation parantuessa (kuva 63). Profilometrimittauksessa suurimmalla mitta-alueella (cut-off 10 mm) saavutettiin erittäin hyvä korrelaatio (kuva 64). Myös formaation vaikutuksen alapuolelle jäävällä mitta-alueella (cut-off 0,1 mm) korrelaatio oli käytännössä täydellinen.



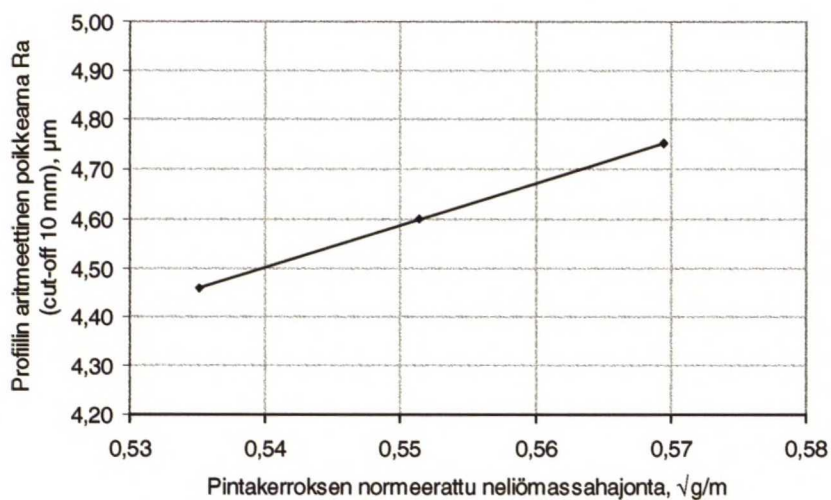
Kuva 61. Taustakerroksen formaation vaikutus taustan Bendtsen-sileyteen.



Kuva 62. Taustakerroksen formaation vaikutus taustan PPS 10-sileyteen.



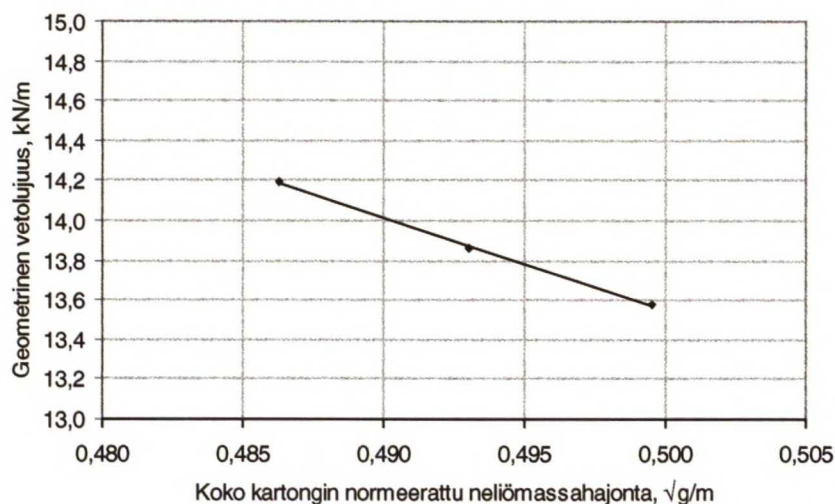
Kuva 63. Taustakerroksen formaation vaikutus taustan vesiabsorptioon.



Kuva 64. Pintakerroksen formaation vaikutus pintaprofiilin aritmeettiseen poikkeamaan.

Saatujen tulosten perusteella voitiin siis havaita kartongin pinnan sileyden ja vesiabsorption korreloivan merkittävästi formaation kanssa. Huokoisuus (Gurley-Hill) pysyi kuitenkin lähes samana kaikissa koepisteissä ja K&N värinabsorptiokyvyn osalta tulokset olivat epäselviä (liite 6).

Kartongin lujuusominaisuuksia tarkastelemalla havaittiin kartongin vetolujuuden pienenemisen konesuunnassa ja kasvavan poikkisuunnassa koeajon aikana. Kuituorientaatio siis muuttui, vaikka suihkusuhde olikin vakio. Tarkastelemalla geometristä vetolujuutta voitiin havaita kartongin vetolujuuden kasvavan formaation parantuessa (kuva 65). Puhkaisulujuus tosin pieneni samalla hieman. Koepisteiden määrä oli kuitenkin liian pieni, jotta formaation vaikutuksesta kartongin lujuusominaisuuksiin voitaisiin tehdä pitkälle meneviä johtopäätöksiä.



Kuva 65. Kartongin formaation vaikutus geometriseen vetolujuuteen.

11 KILPAILIJAVERTAILU

11.1 Formaation vaikutus kartongin painettavuuteen ja sileyteen

Kilpailijavertailussa tarkasteltiin 19 erilaista graafista kartonkinäytettä. Näytteet oli ke-
rätty ja analysoitu keväällä 2001 tehtyä kilpailijavertailua varten. Tätä tarkastelua var-
ten näytteistä mitattiin lisäksi formaatio. Tarkoituksena oli selvittää, miltä osin formaa-
tio selittää kartonkien pintaominaisuuksien eroja. Mittaustulokset on esitetty liitteessä
7 ja niiden analysointiin on käytetty lineaarista regressioanalyysiä.

Eri kartonkien ja kartonkilajien vertaaminen toisiinsa on kuitenkin ongelmallista. Ensik-
sikin kilpailijanäytteet eivät useinkaan ole edustavia; poikkiratanäytteitä kilpailijoiden
kartongeista on mahdotonta saada. Näin määritetyt ominaisuudet eivät välttämättä
kuvaavaa koko kartonkia vaan kysymyksessä on lähinnä otos joltakin kohtaa kartonkiko-
neen poikkirataa. Lisäksi yhden näytepalletin valmistukseen on voitu käyttää useam-
paa kuin yhtä asiakasrullaa. Siten on mahdollista, että kaikkia eri ominaisuuksia ei ole
mitattu samasta kohtaa poikkirataa, mikä vielä lisää hajontaa. Tämä ei myöskään
täytä Saran esittämää /36/ vaatimusta siitä, että formaatio tulisi mitata vähintään vii-
destä eri poikkiradan kohdasta.

Toiseksi kilpailijanäytteiden ongelmana on se, ettei kartongin rakenteesta tai koostu-
muksesta ole saatavissa varmaa tietoa. Esimerkiksi päällystekerrosten määrää tai
laatua voi olla vaikea analysoida. Kartonkien pintapuolelta ovat lähes kaikissa näytteis-
sä kahteen tai kolmeen kertaan päällystettyjä ja kalanteroituja. Taustapuolella esiintyy
enemmän erilaisia vaihtoehtoja, sillä osalla kartongeista taustaa ei ole ollenkaan
päällystetty, osalla se on pigmentoitu ja osalla kahteen kertaan päällystetty. Kahta
samanlaista kartonkia ei näiden näytteiden joukossa ollut. Kaikkien näiden epätark-
kuutta aiheuttavien tekijöiden vuoksi tässä esitettyjä tuloksia voidaan pitää lähinnä
suuntaa antavina.

Koko aineistoa analysoimalla saadut korrelaatiokertoimet on esitetty taulukossa 13.
Normeerattu neliömassahajonta korreloi varsin heikosti pintaominaisuuksien ja pai-
nettavuuden kanssa. Lähes merkittävä korrelaatio ($R=0,43$) esiintyy normeeratun ne-
liömassahajonnan ja taustapuolen Bendtsen-sileyden kanssa. Toinen kohtuullisen
suuri korrelaatio ($R=-0,40$) esiintyy normeeratun neliömassahajonnan ja taustapuolen

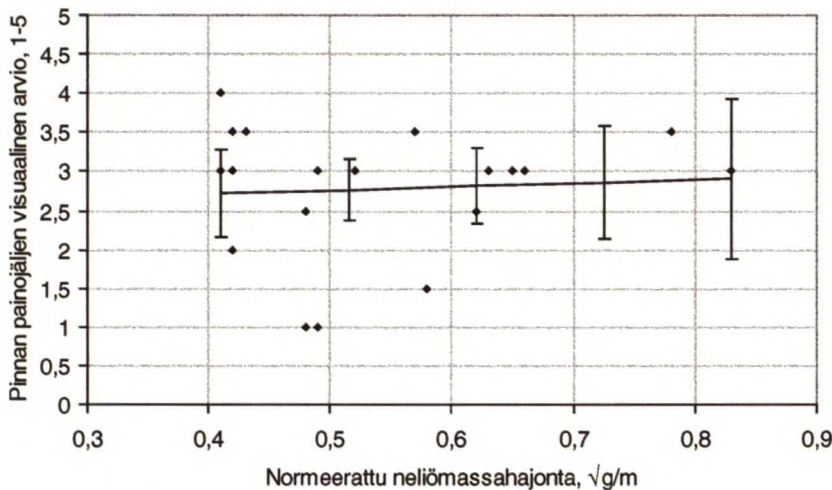
vedenabsorptiokyvyn (Cobb) välillä. Painojäljen kanssa normeerattu neliömassahajonta korreloi puolestaan hyvin heikosti (pinta $R=0,06$ (kuva 66) ja tausta $R=0,13$). Sen sijaan värinabsorptiokyvyn kanssa painojälki korreloi voimakkaasti sekä pinta- ($R=0,43$) että taustapuolella ($R=0,47$, merkittävä 95 % luottamusvälillä).

Taulukko 13. Normeeratun neliömassahajonnan ja pintaominaisuuksien sekä pintaominaisuuksien ja painojäljen väliset korrelaatiokertoimet (kaikki kilpailijanäytteet).

Lineaarinen korrelaatio-kerroin	Sileys pinta	Sileys tausta	PPS pinta	PPS tausta	Cobb pinta	Cobb tausta	Kiilto pinta	Kiilto tausta	K&N väriab-sorp. pinta	K&N väriab-sorp. tausta	K&N huok. pinta	K&N huok. tausta	Paino-jälki pinta	Paino-jälki tausta
Norm. formaatio	0,34	0,43	0,28	0,31	-0,13	-0,40	-0,25	-0,26	-0,29	0,03	0,04	0,06	0,06	0,13
Painojälki pinta	0,40	x	0,32	x	0,27	x	0,01	x	0,43	x	-0,19	x	1,0	x
Painojälki tausta	x	0,22	x	0,28	x	0,21	x	-0,05	x	0,47*	x	0,27	x	1,0

*) lineaarinen korrelaatio merkittävä 95 % luottamusvälillä

x) jätetty merkitsemättä selvyysvuoksi



Kuva 66. Koko aineistosta laskettu pinnan painojäljen visuaalisen arvion ja normeeratun neliömassahajonnan välinen lineaarinen korrelaatio 95 % luottamusväleineen.

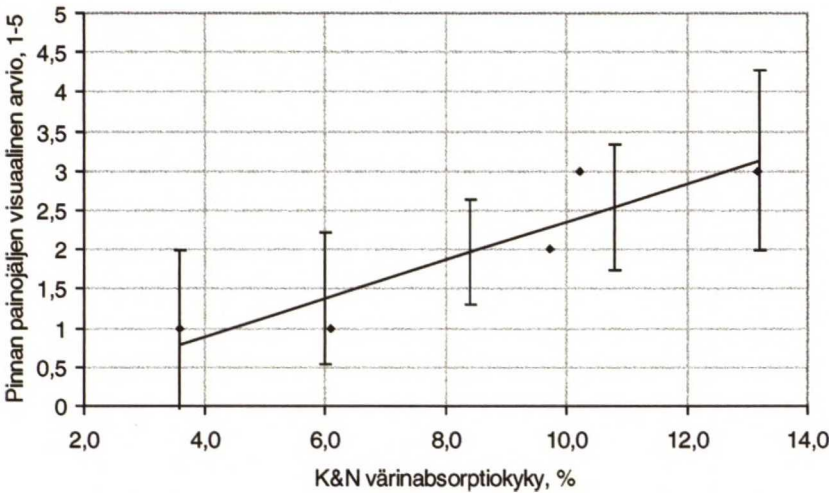
Tarkasteltaessa pelkästään SBS-kartonkeja paranevat korrelaatiokertoimet huomattavasti (taulukko 14), mutta toisaalta myös aineisto kapenee (5 SBS-näytettä). Normeerattu neliömassahajonta korreloi hyvin taustapuolen kiillon ($R=0,92$, merkittävä 95 % luottamusvälillä) ja taustapuolen vedenabsorptiokyvyn kanssa ($R=0,78$). Värinabsorptiokyky selitti pinnan painettavuutta 95 % luottamustasolla merkittävästi sekä pinta- ($R=0,91$) että taustapuolella ($R=0,89$).

Taulukko 14. Normeeratun neliömassahajonnan ja pintaominaisuuksien sekä pintaominaisuuksien ja painojäljen väliset korrelaatiokertoimet (SBS-kartongit).

Lineaarinen korrelaatio-kerroin	Sileys pinta	Sileys tausta	PPS pinta	PPS tausta	Cobb pinta	Cobb tausta	Kiilto pinta	Kiilto tausta	K&N väriabsorp. pinta	K&N väriabsorp. tausta	K&N huok. pinta	K&N huok. tausta	Painojälki pinta	Painojälki tausta
Norm. formaatio	0,53	0,32	0,26	0,03	0,60	0,78	-0,31	0,92*	0,53	0,36	0,65	0,16	0,39	0,49
Painojälki pinta	0,69	x	0,71	x	0,79	x	0,14	x	0,91*	x	0,65	x	1,0	x
Painojälki tausta	x	0,83	x	0,76	x	0,68	x	0,15	x	0,89*	x	0,86	x	1,0

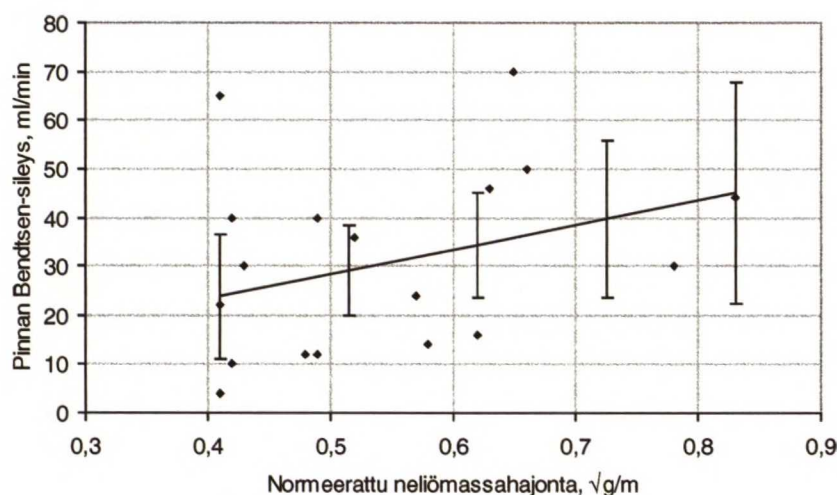
*) lineaarinen korrelaatio merkittävä 95 % luottamustasolla
x) jätetty merkitsemättä selvyuden vuoksi

Saatujen tulosten perusteella K&N värinabsorptiotestin avulla voidaan melko luotettavasti ennustaa graafisen kartongin painettavuutta (kuva 67). Pieni värinabsorptiokyky ennusti hyvää painettavuutta 95 % luottamustasolla (ainoa poikkeus oli koko aineistosta määritetty pinnan värinabsorptiokyvyn korrelaatio pinnan painojäljen visuaalisen arvion kanssa (taulukko 13), jossa luottamuskväliksi saatiin 92 %).

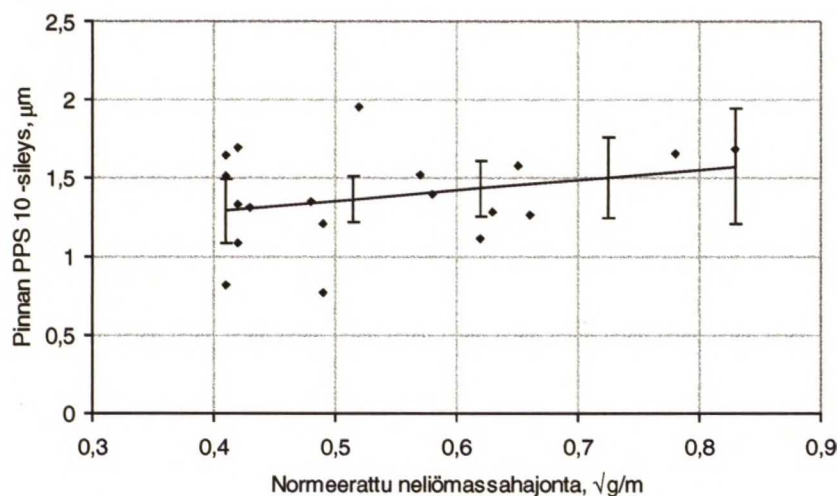


Kuva 67. SBS-kartonkinäytteiden pinnan visuaalisen painojäljen arvion ja K&N värinabsorption välinen lineaarinen korrelaatio 95 % luottamuskväleineen.

Kartongin sileyden osalta voidaan todeta, että formaatio korreloi kummassakin analysoidussa ryhmässä positiivisesti sekä Bendtsen- että PPS-sileyden kanssa (kuvat 68 ja 69). Korrelaatiokertoimet ovat kaikissa tapauksissa suurempia Bendtsen- kuin PPS-sileyden kohdalla.



Kuva 68. Koko aineistosta laskettu pinnan Bendtsen-sileyden ja normeeratun neliömassahajonnan välinen lineaarinen korrelaatio 95 % luottamusväleineen.



Kuva 69. Koko aineistosta laskettu pinnan PPS 10 -sileyden ja normeeratun neliömassahajonnan välinen lineaarinen korrelaatio 95 % luottamusväleineen.

Kilpailijavertailun tuloksista voidaan yhteenvedona todeta, että sileä pinta, jonka värinabsorptiokyky on pieni, antaa hyvän painojäljen. Kartongin formaatiolla ei näytä olevan kovin suurta vaikutusta kartongin painettavuuteen tai silyteen, joskin korrelaatiokerroin on kaikissa analysoidussa tapauksissa positiivinen. Tämä tulos on yhtenevä aiempien tutkimuksien kanssa, joista osassa on havaittu formaation ja painojäljen epätasaisuuden välillä vallitsevan heikon korrelaation ja joissakin tapauksissa tätä korrelaatiota ei ole pystytty ollenkaan osoittamaan /69/. Myös Bery et al. /80/ tekemät tutkimukset osoittivat, ettei hyvän painojäljen omaavilla kartongeilla välttämättä ollut sekä hyvää formaatiota että hyvää silyttä. Formaation vaikutus vedenabsorptioky-

kyyn, kiiltoon, värinabsorptiokykyyn ja huokoisuuteen jäi tämän aineiston perusteella epäselväksi ja osin ristiriitaiseksi.

11.2 Kuidunpituus ja pituusmassa

Ensocoat-kartongin ja graafisten SBS-kartonkien yleisesti tunnustetun laatujohtajan (C-näyte) kuituseosten kuidunpituudet ja pituusmassat tutkittiin FiberLab-laitteella. Saadut tulokset on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. Kartonkinäytteistä määritetyt kuidunpituudet ja pituusmassat.

Kartonki	Pituuspainotettu kuidunpituus L (mm)	Pituusmassa ω (mg/m)
Ensocoat	1,25	0,106
C-näyte	1,71	0,123

C-näytteen kuituseoksen pituuspainotetusta kuidunpituudesta voidaan päätellä, että siinä on käytetty huomattavasti enemmän pitkäkuituista valkaistua sellua kuin Ensocoatissa. Pidempien ja pituusmassaltaan raskaampien kuitujen tuottaman formaation tulisi olla suhteessa huonompaa. Näille kahdelle kuituseokselle voidaan laskea miehitysluku esimerkiksi sakeudessa 3 g/l kaavan 12 avulla. Tällöin Ensocoatin kuituseoksen miehitysluku on 23 ja C-näytteen 37.

Näistä kahdesta kuituseoksesta samassa sakeudessa valmistettujen kartonkien formaatioiden tulisi siis poiketa toisistaan. Näin ei kuitenkaan ole, vaan normeerattu neliömassahajonta oli molemmille kartongeille $0,48 \sqrt{\text{g/m}}$. Hyvän formaation tuottamisen edellytyksiä arvioitaessa on lisäksi otettava huomioon konekonstruktio ja prosessin hallintasuureet. Ensocoat-kartongin valmistusta kolmikerroksisella tasoviiraosalla on käsitelty jo aiemmin. C-näytettä tiedetään valmistettavan tasoviiralla, jonka päälle muodostetaan neljä lisäkerrosta toisioperälaatikkojen ja niitä välittömästi seuraavien Bel Bond -formereiden avulla. Näiden molempien konekonstruktioiden kyky tuottaa pienen neliömassahajonnan omaavaa kartonkia pitäisi olla hyvä.

Taulukon 15 arvoilla ja sakeudella 0,3 % saadaan Ensocoatille laskettua kaavan 13 avulla formaatioksi $0,65 \sqrt{\text{g/m}}$, mikä kerrottuna 0,7:llä (formerin vaikutus) antaa tulokseksi $0,46 \sqrt{\text{g/m}}$, mikä on hyvin lähellä mitattua arvoa $0,48 \sqrt{\text{g/m}}$. C-näytteen huomattavasti laskennallista formaatiota ($0,89 \sqrt{\text{g/m}}$) parempi formaatio ($0,48 \sqrt{\text{g/m}}$) voidaan selittää toisioperälaatikkojen ja neljän Bel Bond -formerin vaikutuksella. Toisioperälaa-

tikkojen avulla raina muodostetaan edellisten kerrosten päälle, jolloin jo muodostunut raina muodostuu osittain uudelleen samalla tasoitteen epätasaisuuksia /20, 93/.

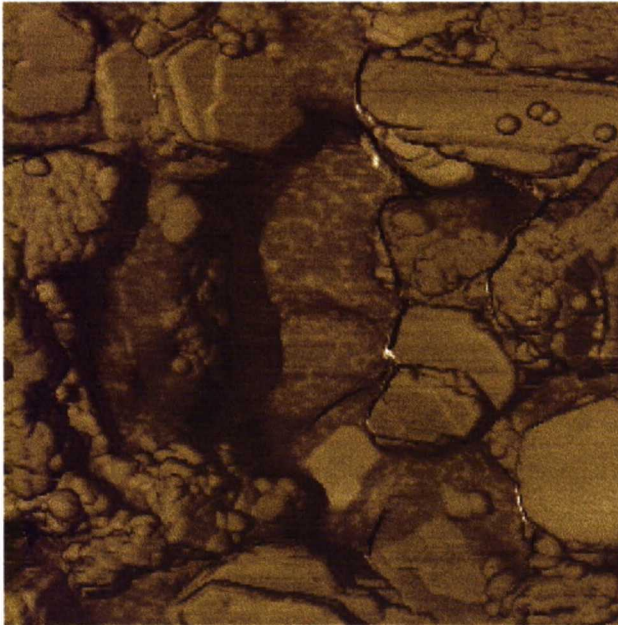
Nämä tiedot eivät kuitenkaan vielä riitä luotettavien johtopäätösten tekemiseen. Ajo-olosuhteista ei ole olemassa tarkempaa tietoa eikä mitattuja näytteitäkään ole yhtä enempää käytettävissä. Ensocoatin formaatitaso näyttää tässä vertailussa olevan kuitenkin edellytystensä mukaisella tasolla. Formaation parantaminen tästä vaatii siis muutoksia joko perälaatikkosakeuksiin tai keskimääräisen kuidunpituuden ja pituusmassan pienentämistä. Kasvattamalla valkaistun koivusulfaatin osuutta runkokerroksessa saavutettiin merkittävä formaatitason parannus, kuten edellä kohdassa 9.5 on esitetty.

11.3 AFM-tarkastelu

Atomivoimamikroskoopin (AFM) avulla tarkasteltiin Ensocoat-kartonkia ja parasta kilpailijakartonkia, C-näytettä. Tarkoituksena oli selvittää, löytyykö kartonkien pintarakenteista merkittäviä eroavaisuuksia, jotka voisivat selittää C-näytteen paremman painettavuuden ja sileyden. AFM-tutkimus toteutettiin Teknillisen korkeakoulun Paperiteknikan laboratoriossa. Tarkempi kuvaus AFM-laitteistosta on esitetty liitteessä 1.

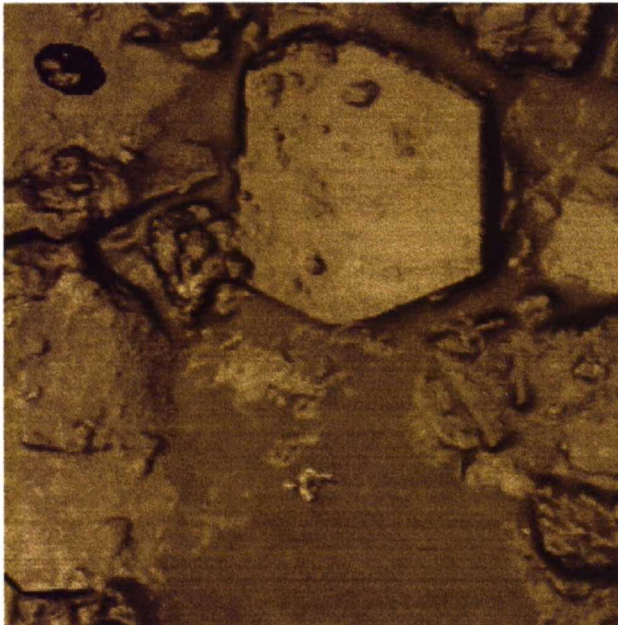
Atomivoimamikroskoopin tapping-moodilla suoritettu tarkastelu osoitti päällysteen rakenteen ja koostumuksen olevan suunnilleen samanlainen molemmissa kartongeissa. Helposti tunnistettavia komponentteja olivat kaoliini ja kalsiumkarbonaatti. Kaoliini esiintyy kuusikulmaisina levyäisinä partikkeleina ja kalsiumkarbonaatti vaaleampina rakeisina kasautumina. Kolmas merkittävä komponentti oli styreeniakrylaattilateksi, joka koostuu nimensä mukaisesti styreeni- ja akrylaattimonomeereista. Näistä toinen on huomattavasti kovempi kuin toinen, minkä vuoksi lateksipinta näyttää faasikuvissa laikukkaalta (kovemmat (jäykemmät) alueet näkyvät faasikuvissa vaaleampina). Näin lateksin peittämät pinnat voidaan silmämääräisesti erottaa mineraalipitoisista alueista.

Lateksialueissa havaittiin kartonkien välillä selvä ero. C-näytteessä lateksin kaksi monomeerilajia erottuivat toisistaan selvästi (kuva 70). Ensocoatissa lateksialueet olivat sen sijaan hyvin tasaisen näköisiä (kuva 71). Tämä voi johtua siitä, että Ensocoatissa käytettävän lateksin monomeerien välinen kovusero on pienempi.



1 μm x 1 μm

Kuva 70. AFM-kuva C-näytteen pinnasta. Kuvan keskellä näkyvässä lateksin peittämässä pinnassa voidaan havaita kaksi eri monomeerilajia.



1 μm x 1 μm

Kuva 71. AFM-kuva Ensocoat-kartongin pinnasta. Kuvan alareunassa näkyvästä lateksin peittämästä pinnasta ei voida erottaa eri monomeerilajeja.

Atomivoimamikroskoopin analyysiohjelmalla laskettiin lisäksi Ra-karheudet erikokoisille kuville (taulukko 16). Ra-karheus kuvaa keskitasosta laskettujen korkeuserojen itseisarvojen aritmeettista keskiarvoa. Tämän mittakaavan karheudet lasketaan yleensä optisen ja mikrokarheuden piiriin kuuluviksi.

Taulukko 16. Kartonkinäytteistä erikokoisilta mittausalueilta määritetyt Ra-karheudet.

Mittausalue	Ensocoat, Ra-karheus (nm)	C-näyte, Ra-karheus (nm)
1 μm x 1 μm	32,2; 57,0	34,7; 47,0
5 μm x 5 μm	86,8; 71,5; 56,2; 64,1; 70,6; 46,2; 29,8 keskiarvo 60,7	69,6; 66,6; 65,8; 65,6; 41,0; 46,9 keskiarvo 59,3
10 μm x 10 μm	80,8; 94,4	68,7; 108,2

Taulukossa 16 esitettyjen tulosten perusteella C-näytettä ei voida pitää tarkastellussa mittakaavassa Ensocoatia sileämpänä. Toisaalta rinnakkaismääritysten lukumäärä on liian pieni ja hajonta liian suuri pitkälle menevien johtopäätösten tekemiseen.

Atomivoimamikroskooppitarkastelun tulosten perusteella ei voida juurikaan tehdä johtopäätöksiä. Päälystetyt kartongin pintakerrokset eivät poikkea toisistaan mitenkään merkittävästi. Latekseissa on ilmeisesti jonkinlainen ero, mikä voisi selittää näytteiden erilaisia painatusominaisuuksia. Päälysteen koostumukseen liittyvät tekijät eivät kuitenkaan kuulu tämän tarkastelun piiriin, joten tarkemmat selvitykset jäävät tuleviin tutkimuksiin. Kartonkien normeerattu neliömassahajonta oli myös sama, joten formaation vaikutusta sileyteen ja painettavuuteen ei voida tässä arvioida.

12 TULOSTEN LUOTETTAVUUDEN ARVIOINTI

Luottamusvälillä tai -tasolla tarkoitetaan sitä rajattua väliä, millä tietyn muuttujan arvo määrätyllä todennäköisyydellä sijaitsee. Yleisimmin käytetty luottamusväli on 95 % luottamusväli. Tämä tarkoittaa sitä, että tutkittava ilmiö tai muuttuja osuu luottamusvälin ylä- ja alarajan väliselle alueelle 19 kertaa 20:stä.

Kolmessa ensimmäisessä koeajossa on esitetty järjestelmällisesti saatujen tulosten 95 % luottamusväli. Luottamusvälin laskenta tapahtui automaattisesti Statistica-ohjelmassa faktorikokeiden tulosten analysointiin suunnitellun moduulin avulla. Kaikkien niiden tulosten, joiden on ilmoitettu olevan merkittäviä 95 % luottamusvälillä, voidaan olettaa melko varmasti pitävän paikkansa.

Koeajojen aikana on kuitenkin voinut esiintyä yhdysvaikutuksia ja prosessin ajautumista johonkin tilaan siten, ettei sitä ole osattu ottaa huomioon kokeita suunniteltaessa. Tällöin tuloksiin sovellettu malli ei välttämättä pidäkään paikkaansa vaan taustalla vaikuttaa joku muu kuin tarkasteltava riippuvuus. Prosessin ajautuminen on voinut helpoiten vaikuttaa etenkin koeajojen faktoriin 1, jonka arvoa on tasaisesti kasvatettu koeajojen kestäessä. Tällainen faktori on erityisen altis prosessin ajautumiselle, esimerkiksi PPS-sileyden tasaiselle heikkenemiselle päällystysterien kuluessa. Näin voisi olettaa käyneen esimerkiksi Ensocoat 230 g/m² -koeajossa, jossa kartongin normeeratun neliömassahajonnan parantuessa pinnan PPS 10 -sileys heikkenee merkittävästi 95 % luottamustasolla. Koeajon aikana runkokerroksen koivuosuutta kasvatettiin nimittäin tasaisesti PPS 10 -sileyden heiketessä vastaavasti koeajon loppua kohden, mikä voidaan olettaa selittävän kyseisen merkittävän riippuvuuden.

Faktorikokeiden analysointi onnistuu luotettavasti vain silloin, kuin kaikki yhdysvaikutukset voidaan ottaa tulosten analysoinnissa huomioon. Näin ei kuitenkaan koskaan tapahdu paperinvalmistuksessa. Prosessi on jo itsessään täynnä mitä monimutkaisimpia yhdysvaikutuksia. Koeajoja suunnitellessa voidaan vain yrittää parhaan mukaan sulkea pois voimakkaimmat ja häiritsevimmät yhdysvaikutukset.

Neljännessä, päällystämättömässä koeajossa ei voitu suorittaa tulosten luotettavuuden arviointia koepisteiden vähäisyyden vuoksi. Lineaarinen korrelaatio kolmen koepisteen välillä voi olla sattumalta lähes täydellinen vaikka tutkittavilla muuttujilla ei olisi mitään tekemistä toistensa kanssa. Päällystämättömän koeajon tulosten tarkastelun luotettavuutta onkin pyritty parantamaan käyttämällä hyväksi kirjallisuudessa esitettyjä tietoja ja aiempien koeajojen tuloksia.

Tulosten luotettavuuden osalta täytyy todeta kolmen seikan pienentäneen sitä. Ensimmäinen tekijä oli koeajojen suoritus tuotantomittakaavassa kartonkikoneen normaalin tuotannon aikana, mikä rajoitti käytettyjen muuttujien arvotasojen valintaa pienentäen siten vasteita. Toinen oli jo valmiiksi asetettu haastava tavoite tarkastella pohjakartongin vaikutuksia päällystetyn pinnan ominaisuuksiin. Kolmas luotettavuutta heikentävä tekijä oli rinnakkaismääritysten vähäisyys. Varsinkaan erikoismenetelmissä ei voitu suorittaa kuin yhden näytearkin tarkastelu aika- ja kustannussyistä. Näitä seikkoja pyrittiin kompensoimaan tieteellisellä koeajojen suunnittelulla ja tulosten analysoinnilla. Kaikesta huolimatta satunnaisvaihtelun osuus koepisteiden mittaustulosten vasteissa jäi valitettavan suureksi.

Referenssikoepisteiden ja toistokokeiden merkitys jäi lopulta vähäiseksi. Referenssikoepisteiden arvo tulosten tulkinnassa oli faktorikokeista johtuen mitätön, sillä siinä faktorit eivät yleensä olleet tavoitetasollaan. Lisäksi ensimmäisen koepisteen toisto koeajon lopuksi osoitti lähinnä sen, ettei täysin samaan prosessin tilaan päästy enää uudestaan. Näiden koepisteiden mukaanotto tulosten tarkasteluun vaikeutti tarkastelua entisestään ja siitä päätettiin luopua. Toistokokeiden perusteella voitiin kuitenkin todeta prosessin pysyneen suhteellisen hyvin hallinnassa koeajojen aikana.

Pintaominaisuuksien mittausta haittasi merkittävästi päällysteen hallitseva vaikutus. Esimerkiksi polttopeittävyysmenetelmän tuloksista ei voitu sanoa juuri mitään, sillä päällysteen peittävyys oli kaikissa koepisteissä lähes täydellinen. Samoin kävi myös absorptio-ominaisuuksia, pinnan profiilikarheutta ja painojälkeä tarkasteltaessa. Formaation parantamiseen tähtäävät toimenpiteet onnistuivat kuitenkin hyvin ja formaatiota voitiin useissa tapauksissa parantaa merkittävästi. Kuitenkaan merkittäväkään formaation parantuminen ei välttämättä saanut aikaan merkittävää vastetta kartongin pintaominaisuuksissa.

Koeajojen suunnittelun osalta voidaan vielä lopuksi todeta koeajojen olleen ajallisesti varsin pitkiä. Katkojen ja häiriötilanteiden esiintyminen ja prosessin ajautuminen on varsin todennäköistä näin pitkien koeajojen aikana. Ehkäpä koeajot olisi voinut toteuttaa myös 2^n -faktorikokeina parilla koesuunnitelman keskipisteeseen lisätyllä koepisteellä varustettuna. Faktorikokeiden soveltuvuus monimutkaisten ja useista eri tekijöistä riippuvien laatuominaisuuksien analysointiin osoittautui myös kyseenalaiseksi. Hallintasuureiden suora vaikutus formaatioon oli helppo todeta, mutta pohjakartongin formaation epäsuoraa vaikutusta päällystetyn kartongin pintaominaisuuksiin oli usein mahdotonta havaita.

13 YHTEENVETO

Formaatiolla tarkoitetaan paperin neliömassan pienimittakaavaista vaihtelua paperin tasossa. Formaation mittakaavaksi on käytännössä vakiintunut aallonpituusalue 0,1...100 mm. Neliömassavaihtelu on ominaista paperinvalmistusprosessille, jossa vaihtelua synnyttää sekä itse prosessin satunnainen luonne että kuitujen taipumus muodostaa verkostoja. Massasuspension ominaisuudet, ajotapatekijät ja paperinvalmistusprosessin rakennetekijät vaikuttavat muodostuvan paperin formaatioon.

Paperin neliömassan pienimittakaavainen epätasaisuus heijastuu paperin pintaominaisuuksiin ja rakenteeseen aiheuttaen niissä pienimittakaavaista vaihtelua. Paperinvalmistusprosessin aikana rainan painavampiin kohtiin kohdistuu erilainen käsittely kuin kevyempiin kohtiin. Valmiissa paperissa esiintyy tästä syystä vaihtelua huokosrakenteessa, pintaominaisuuksissa, lujuudessa, optisissa ominaisuuksissa, kokoonpuristuvuudessa, paksuudessa ja tiheydessä.

Tämän työn tavoitteena oli parantaa graafisen Ensocoat-kartongin kilpailukyvyn kannalta keskeisiä pinta- ja painettavuusominaisuuksia formaatiota parantamalla. Työn kokeellisessa osassa keskityttiin parantamaan kartongin formaatiota ja tutkimaan formaation vaikutusta kartongin pintaominaisuuksiin neljän tehdasmittakaavaisen kartonkikonekoeajon avulla. Lisäksi kilpailijavertailun avulla tarkasteltiin graafisten kartonkien formaation vaikutusta pintaominaisuuksiin ja painojälkeen.

Kokeelliselle osalle asetetuista tavoitteista ensimmäinen, pohjakartongin formaation parantaminen, saavutettiin helposti. Toinen, jo alkujaan haastavaksi tiedetty tavoite kartoittaa pohjakartongin formaation vaikutuksia päällystetyn kartongin pintaominaisuuksiin, jäi osittain saavuttamatta tulosten ristiriitaisuuden vuoksi.

Perälaatikoiden hallintasuureiden optimointikoeajossa mikään pintakerroksen perälaatikon hallintasuureista ei vaikuttanut merkittävästi kartongin formaatioon. Päällystetyn pintakerroksen formaatio oli selvästi parempi ja koepisteiden välinen vaihtelu pienempää kuin taustakerroksessa. Teräpäällistykseen pienimittakaavaista neliömassahajontaa tasoittava vaikutus oli ilmeinen niin tässä kuin muissakin päällystetyissä koeajoissa. Päällystämättömässä koeajossa pinta- ja taustakerroksen formaatio oli samalla tasolla.

Runkokerroksen osalta sekä suihku/viira-nopeussuhde että huuliaukko osoittautuivat merkittäviksi formaatioon vaikuttaviksi hallintasuureiksi 95 % luottamustasolla. Myös taustakerroksessa suihku/viira-nopeussuhteen vaikutus oli merkittävä. Huulieron ei voitu todeta vaikuttanut minkään perälaatikon osalta merkittävästi formaatioon. Run-

kokerroksessa paras formaatio saavutettiin suurella ja taustakerroksessa pienellä suihku/viira-nopeussuhteella. Kaikissa kerroksissa paras formaatio saavutettiin suurimmalla huuliaukolla eli alhaisimmalla perälaatikon sakeudella. Runkokerroksen formaation voitiin todeta vaikuttavan 95 % luottamustasolla merkittävästi kartongin pinnan ja taustan Bendtsen-sileyteen.

Kartongin formaatiota pyrittiin edelleen parantamaan kahden koeajon avulla (lajeilla Ensocoat 230 g/m² ja 275 g/m²), joissa kartongin runkokerroksen keskimääräistä kuidunpituutta alennettiin ja kerrosneliöpainojen jakaumaa muutettiin. Pintakerroksen formaation havaittiin näissäkin koeajoissa korreloivan kaikkein heikoimmin hallintasuu- reiden muutoksien kanssa. Runkokerroksen formaatiota pystyttiin parantamaan merkittävästi sekä kevyemmällä (20 %) että raskaammalla (14 %) neliöpainolla koi- vuosuutta kasvattamalla. Taustakerroksen formaatio ei parantunut merkittävästi koe- ajon aikana, joskin perälaatikon virtausmäärän kasvun voitiin todeta parantavan hie- man formaatiota.

Runkokerroksen lyhytkuituosuuden kasvattaminen osoittautui merkittäväksi keinoksi parantaa kartongin formaatiota. Tulokseen sovitettun mallin mukaan koko kartongin normeerattu neliömassahajonta pieneni kevyemmällä lajilla 14 % ja raskaammalla lajilla 5 % siirryttäessä 70 % koivuosuudesta 100 % koivuosuuteen. Kerrosten formaation mittaustuloksista voitiin myös havaita, että runkokerroksen formaatio oli koi- vuosuuden kasvun ansiosta huomattavasti pinta- ja taustakerrosta paremmalla tasol- la. Käytettäessä runkokerroksessa 100 % koivuosuutta on formaation kannalta edul- lista muodostaa mahdollisimman suuri osa rainasta runkokerroksen viiraosalla.

Kartongin formaation parantamiseen tähtäävissä koeajoissa analysoitiin myös for- maation vaikutuksia kartongin pintaominaisuuksiin. Korrelaatiokertoimet jäivät kuiten- kin alhaisiksi kautta linjan. Sileyden voitiin osoittaa korreloivan raskaammalla lajilla kaikissa tapauksissa positiivisesti formaation kanssa. Kartongin normeerattu neliö- massahajonta korreloi merkittävästi pinnan Bendtsen-sileyden kanssa. Painojäljen visuaalisen parittaisvertailun tulokset jäivät myös ristiriitaisiksi. Painojäljen laikullisuus korreloi hyvin heikosti kartongin formaation kanssa. Muistakaan pintaominaisuuksien mittausten menetelmien tuloksista ei voitu vetää merkittäviä johtopäätöksiä. Prescale- määrityksestä laskettu flokkikoko korreloi kuitenkin merkittävästi formaation kanssa. Hyvän formaation omaavan kartongin flokkikoko oli pieni. Erityisesti runkokerroksen formaatio vaikutti merkittävästi flokkikokoon.

Lyhytkuituosuuden kasvattamisella ei voitu havaita olevan haitallisia vaikutuksia mi- hinkään kartongin merkittävään tilasuureeseen. Tämän vuoksi kartonkikone 2:lla val-

mistettujen graafisten kartonkien runkokerroksen neitseellinen kuitu on ollut 100 % koivusellua joulukuun 2001 puolivälistä alkaen. Korvattaessa runkokerroksen mäntymassan osuus koivumassalla voitiin myös tuotantokustannuksia alentaa 6,2 €/t.

Päällystämättömässä koeajossa parannettiin pinta- ja taustakerroksen formaatiota perälaatikkosakeuksia alentamalla. Formaatio parani lähes lineaarisesti sakeuden funktiona. Pinta- ja taustakerroksen sileydet korreloivat kaikissa tapauksissa voimakkaasti formaation kanssa. Pohjakartongin sileyttä voidaan saatujen tulosten perusteella selvästi parantaa formaatiota parantamalla. Korrelaatioiden merkittävyyttä kasvattaa se, että runkokerroksen formaatiota pidettiin vakiona koeajon ajan eli formaation muutos koko kartongin mittakaavassa oli pientä. Silti kartongin sileys parani selvästi.

Kilpailijavertailussa tarkasteltiin 19 graafista kartonkinäytettä. Kartongin formaation korrelaatio pintaominaisuuksien kanssa jäi useimmiten varsin pieneksi. Formaation vaikutus painatustulokseen oli hyvin pieni. Sekä kartongin pinta- että taustapuolen Bendtsen- ja PPS-sileydet korreloivat kaikissa tutkituissa tapauksissa positiivisesti formaation kanssa. Tutkitun aineiston laajuuden perusteella voidaan todeta formaation selittävän pinnan sileyttä ainakin jonkin verran.

Ensocoat-kartonkia verrattiin myös kuidunpituusmäärittelyn ja AFM-tarkastelun avulla sileydeltään ja painojäljeltään parhaaseen kilpailijaan. Mitään merkittäviä eroja kartonkien väliltä ei löydetty. Lisäksi runkokerroksen koivuosuuden kasvattamisen jälkeen Ensocoat-kartongin formaation voitiin todeta olevan markkinoiden parhaalla tasolla.

Syytä Ensocoat-kartongin sileyden ja painatusominaisuuksien edellytyksiään huonompaan tasoon tulisikin tulevaisuudessa etsiä jostain muualta kuin pohjakartongin formaatiosta. Kartongin kalanterointi ja päällystäminen nousevat tässä avainasemaan. 1-kalanteria tulisi käyttää tehokkaammin kartongin tiheyden ja huokoskokojakauman säädössä tasaisen päällystettävän pohjakartongin saavuttamiseksi. Tähän tarkoitukseen voisi myös ajatella välikalanteroinnin (wet-stack) käyttöönottoa. Pohjakartongin epätasaisen huokoskokojakauman tiedetään vaikuttavan merkittävästi päällystemäärän epätasaisuuteen ja sitä kautta painojäljen epätasaisuuteen ja laikullisuuteen. Myös itse päällysteen koostumusta ja päällystysmenetelmiä tulisi kehittää.

Pohjakartongin formaation vaikutusta päällystetyn kartongin pintaominaisuuksiin ei pystytty tässä työssä luotettavasti osoittamaan. Haluttaessa tarkempaa tietoa jouduttaisiin ilmeisesti turvautumaan pilot-mittakaavan kokeiden suoritukseen. Tuotantomittakaavan koeajoissa muuttujien vakiointi ja satunnaisvaihtelun osuuden hallinta osoittautuivat varsin vaikeiksi tehtäviksi.

LÄHDELUETTELO

1. Kiviranta, A., Paperboard grades. Paper and Board Grades, Toim. Paulapuro, H., Julk. Fapet, Helsinki, 2000, s. 55-72.
2. McKendree, J., Coated SBS Board. Tappi 2001 Coated Paperboard Short Course. Columbus, GA, October 9-12, 2001. TAPPI Press, Atlanta, GA, 2001, s. 211-219.
3. Haarla, A., Printing and writing papers. Paper and Board Grades, Toim. Paulapuro, H., Julk. Fapet, Helsinki, 2000, s. 13-53.
4. Holm, H. & Paulapuro, H., Laadunvalvonta paperiteollisuudessa. Paperin valmistus, osa 2, 2. painos. Toim. Arjas, A., Julk. Suomen paperi-insinöörien yhdistys, Turku, 1983, s. 1321-1343.
5. Paulapuro, H., Paperinvalmistusprosessin vaikutus paperin rakenteeseen. Kuitu- ja paperifysiikka. Teknillinen korkeakoulu, Paperiteknikan laboratorio, Espoo, 1990, 47 s.
6. Anon., Karton Handbuch. Iggesund Paperboard, Iggesund, 1993, 261 s.
7. Suontausta, O., End-use properties of printing papers. Pulp and Paper Testing, Toim. Levlin, J.-E. & Söderhjelm, L., Julk. Fapet, Helsinki, 1999, s. 182-215.
8. Kainulainen, M. & Söderhelm, L., End-use properties of packaging papers and boards. Pulp and Paper Testing, Toim. Levlin, J.-E. & Söderhjelm, L., Julk. Fapet, Helsinki, 1999, s. 216-230.
9. Palonkangas, A., Kartonginvalmistuksen ja lopputuotteen laadun väliset riippuvuudet. Imatra 1990. Metsäteollisuuden Koulutuskeskus, Julkaisu P5504J, Kartonkikoneen määränpään toiminnot. 10 s.
10. Juvonen, K., Kartongin formaation mittaaminen ja formaation vaikutus kartongin pinnan ominaisuuksiin, Lisensiaatintyö. Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos, Espoo, 1993, 89 s.
11. Attwood, B.A., Multiply forming - an overview. Tappi 1998 Multi-ply Forming Forum. Atlanta, GA, February 17-18, 1998. TAPPI Press, Atlanta, GA, 1998, s. 1-8.

12. Johansson, P.-Å. & Norman, B., Methods for evaluating formation, print unevenness and gloss variations developed at STFI. Tappi 1996 Process & Product Quality Conference. Cincinnati, OH, October 14-17, 1996. TAPPI Press, Atlanta, GA, 1996, s. 139-145.
13. Kingsnorth, S.W., Buchanan, J.S. & Jones, G.T., Grammage profile analysis of some multi-ply formers. Pap. Technol. 13(1972)4, s. 273-277.
14. Carlsson, L., Fellers, C. & Jonsson, P., Die Biegesteifigkeit von Wellpappe unter besonderer Berücksichtigung asymmetrischer und mehrlagiger Konstruktionen. Papier 39(1985)4, s. 149-156.
15. Fellers, C. & Carlsson, L.A., Bending Stiffness, with Special Reference to Paperboard. Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard, Volume 1, Toim. Mark, R.E., Julk. Marcel Dekker, New York, 1983, s. 323-347.
16. Kajanto, I., Structural mechanics of paper and board. Paper Physics, Toim. Niskanen, K., Julk. Fapet, Helsinki, 1998, s. 192-221.
17. Fellers, C., de Ruvo, A., Htun, M., Carlsson, L., Engman, C. & Lundberg, R., Carton Board - Profitable use of pulps and processes. Swedish Forest Products Research Laboratory, Stockholm, 1983, 202 s.
18. Carlsson, L.A. & Fellers, C., Flexural stiffness of multi-ply paperboard. Fibre Sci. Technol. 13(1980)3, s. 213-223.
19. Luey, A.T., Stiffness of multiply box board. Tappi 46(1963)11, s. 159-162A.
20. Norman, B., Web forming. Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End, Toim. Paulapuro, H., Julk. Fapet, Helsinki, 2000, s. 191-250.
21. Wahlström, B. & O'Blencs, G., The drainage of pulps at paper-making rates and consistencies using a new drainage tester. Pulp Paper Mag. Can. 63(1962)8, T405-T417.
22. Cresson, T.M., The Sensing, Analysis and Simulation of Paper Formation, Väitöskirja. State University of New York, College of Environmental Science and Forestry, Syracuse, New York, 1988, 273 s.
23. Kajanto, I., Formaatio. Kuitu- ja paperifysiikka. Teknillinen korkeakoulu, Paperiteknikan laboratorio, Espoo, 1990, 17 s.

24. Kajanto, I.M., Komppa, A. & Ritala, R.K., How formation should be measured and characterized. Nord. Pulp Pap. Res. J. 4(1989)3, s. 219-228.
25. Norman, B., Overview of the physics of forming. Fundamentals of papermaking, Transactions of the ninth fundamental research symposium held at Cambridge, volume 3, Toim. Baker, C.F., Julk. Mechanical Engineering Publications, London, 1989, s. 73-149.
26. Kiviranta, A., Kartonkikoneen märkäosan vaikutus taivekartongin formaatioon, Lisen-siaatintyö. Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos, Espoo, 1990, 192 s.
27. Sara, H., The characterization and measurement of paper formation with standard deviation and power spectrum, Väitöskirja. Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostusosasto, Helsinki, 1978, 162 s.
28. Norman, B. & Söderberg, D., Overview of forming literature, 1990-2000. The science of papermaking, Transactions of the 12th fundamental research symposium held in Ox-ford, volume 1, Toim. Baker, C.F., Julk. The Pulp and Paper Fundamental Research So-ciety, Bury, Lancashire, U.K., 2001, s. 431-558.
29. Kajanto, I., Effect of Formation on Print Unevenness with Uncoated Woodfree Papers, Väitöskirja, Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos, Espoo, 1991, 83 s.
30. Lavigne, J.R., Pulp & Paper Dictionary. Miller Freeman Publications, San Francisco, CA, 1986, 488 s.
31. Dictionary of Paper, 5th Edition, Toim. Kouris, M., TAPPI Press, Atlanta, GA, 1996, 347 s.
32. Handbook of Pulp & Paper Terminology: a guide to industrial and technological usage, 2. painos, Angus Wilde Publications, Vancouver, B.C., 2001, 447 s.
33. Nordman, L. & Aaltonen, P., Paperin rakenne. Paperin valmistus, osa 1, 2. painos. Toim. Arjas, A., Julk. Suomen paperi-insinöörien yhdistys, Turku, 1983, s. 169-206.
34. Suomen paperi-insinöörien yhdistyksen oppi- ja käsikirjasarjan sanasto. Toim. Ryti, N., Julk. Suomen paperi-insinöörien yhdistys, Helsinki, 1971, 60 s.
35. Komppa, A., Measurement of formation. Pap. Puu 70(1988)3, s. 243-250.

36. Niskanen, K., Kajanto, I. & Pakarinen, P., Paper structure. Paper Physics, Toim. Niskanen, K., Julk. Fapet, Helsinki, 1998, s. 13-53.
37. Trepanier, R.J., Jordan, B.D. & Nguyen, N.G., Specific perimeter: a statistic for assessing formation and print quality. Tappi J. 81(1998)10, s. 191-196.
38. Komppa, A., Paperin formaatio ja sen mittaus. Pap. Puu 72(1990)6, s. 566-571.
39. Kartovaara, I., Coatweight distribution and coating coverage in blade coating. Pap. Puu 71(1989)9, s. 1033-1042.
40. Anon., Ambertec Beta Formation Tester. Esite, Ambertec [viitattu 23.1.2002]. Saatavilla [www-muodossa: < http://www.ambertec.fi/bft.html >](http://www.muodossa.com: < http://www.ambertec.fi/bft.html >).
41. Keller, D.S. & Pawlak, J.J., β -Radiographic Imaging of Paper Formation Using Storage Phosphor Screens. J. Pulp Pap. Sci. 27(2001)4, s. 117-123.
42. Pawlak, J.J. & Keller, D.S., Analytical Technique for the Comparison of Paper Formation Imaging Methods. J. Pulp Pap. Sci. 27(2001)5, s. 171-176.
43. Reddiough, F. & Heinen, A., Formation und Entwässerung in der Einzel-Langsiebmaschine. Wochenbl. Papierfabr. 19(1998)19, s. 930-936.
44. Parker, J.D., The Sheet-Forming Process. TAPPI STAP No. 9. Technical Association of the Pulp and Paper Industry, Atlanta, GA, 1972, 104 s.
45. Nordström, B., Effects of headbox design and dewatering conditions on twin-wire forming of TMP. Väitöskirja. Royal Institute of Technology, Department of Pulp and Paper Chemistry and Technology, Stockholm, 1995, 60 s.
46. Kiviranta, A., Kuitujen ja paperinvalmistusprosessin vaikutus formaatioon. Vantaa 2000. Metsäteollisuuden Koulutuskeskus, Julkaisu P905602/00, Kuituverkon rakenne ja toimivuus painatuksessa. 19 s.
47. Kerekes, R.J. & Schell, C.J., Characterization of Fibre Flocculation Regimes by a Crowding Factor. J. Pulp Pap. Sci. 18(1992)1, s. J32-J38.
48. Kiviranta, A. & Dodson, C.T.J., Evaluating Fourdrinier Formation Performance. J. Pulp Pap. Sci. 21(1995)11, s. J379-J383.

49. Kerekes, R.J. & Schell, C.J., Effects of fiber length and coarseness on pulp flocculation. Tappi J. 78(1995)2, s. 133-139.
50. Kiviranta, A., Fiber and forming-related mechanisms affecting formation. Tappi 1996 Papermakers conference. Philadelphia, PA, March 24-27, 1996. TAPPI Press, Atlanta, GA, 1996, s. 239-245.
51. Kiviranta, A., Table activity on the Fourdrinier: Its characterization and its effect on formation, Väitöskirja. Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos, Tampere, 1993, 183 s.
52. Jokinen, O., Tutkimus kuitususpension flokkaantumistaipumukseen vaikuttavista tekijöistä. Väitöskirja. Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostusosasto, Espoo, 1984, 90 s.
53. Freeman, W.L., Chemical related factors influencing the balance of formation, drainage and retention. Tappi 1996 Papermakers conference. Philadelphia, PA, March 24-27, 1996. TAPPI Press, Atlanta, GA, 1996, s. 247-252.
54. Räisänen, K., Viiraosan tehtävät ja rakenteet. Lahti 2002. Metsäteollisuuden Koulutuskeskus, Julkaisu P251201, Kartonkikoneen formeriosan hallinta. 10 s.
55. Hietaniemi, M., Opti Feed - Moderni lyhyt kierto ja pitkä kierto. Lahti 2002. Metsäteollisuuden Koulutuskeskus, Julkaisu P251201, Kartonkikoneen formeriosan hallinta. 9 s.
56. Weise, U., Terho, J. & Paulapuro, H., Stock and water systems of the paper machine. Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End, Toim. Paulapuro, H., Julk. Fapet, Helsinki, 2000, s. 123-190.
57. Pantaleo, S.B., Modern headboxes - their role and capabilities in the sheet forming process. Tappi 1997 Wet end operations short course. Memphis, TN, February 10-14, 1997. TAPPI Press, Atlanta, GA, 1997, s. 145-193.
58. Kiviranta, A., Rainanmuodostus paperikoneella. Kajaani 1996. Metsäteollisuuden Koulutuskeskus, Julkaisu P1507J, Paperikoneen märänpään toiminnot. 12 s.
59. Yli-Kokko, E., Perälaatikot. Kajaani 1996. Metsäteollisuuden Koulutuskeskus, Julkaisu P1507J, Paperikoneen märänpään toiminnot. 9 s.
60. Räisänen, K., Perälaatikon ja viiraosan hallinta. Lahti 2002. Metsäteollisuuden Koulutuskeskus, Julkaisu P251201, Kartonkikoneen formeriosan hallinta. 11 s.

61. Manson, D.W., The practical aspects of formation. Tappi 1997 Wet end operations short course. Memphis, TN, February 10-14, 1997. TAPPI Press, Atlanta, GA, 1997, s. 25-53.
62. Aaltonen, P., von Pfaler, J. & Ryti, N., Rainanmuodostus. Paperin valmistus, osa 1, 2. painos. Toim. Arjas, A., Julk. Suomen paperi-insinöörien yhdistys, Turku, 1983, s. 551-606.
63. Thorp, B.A. & Reese, R.A., Turbulence approach to optimizing fourdrinier performance. Tappi J. 68(1985)3, s. 70-73.
64. Kiviranta, A. & Paulapuro, H., The role of fourdrinier table activity in the manufacture of various paper and board grades. Tappi J. 75(1992)4, s. 172-185.
65. Anon., Bilder på Processen, KM8 Formering och Avvattning. Esite, Stora Enso Oyj, 1998, 1 s.
66. Partanen, E.J. & Partonen, M., Formeriosan hallinta. Jyväskylä 2001. Metsäteollisuuden Koulutuskeskus, Julkaisu P15250, Paperikoneen formeriosan hallinta. 24 s.
67. Kufferath, W., The Different Contribution of Wet End Devices to the Sheet Forming Process on a Fourdrinier with regard to Formation. XXIII EUCEPA Conference, The Paper and Board Machine - Today and Tomorrow. Harrogate, U.K., May 31 - June 3, 1988. PITA, Leatherhead, U.K., 1988, volume 1, s. 77-95.
68. Kajanto, I.M., The effect of formation on absolute print unevenness in offset printing. Pap. Puu 72(1990)6, s. 600-610.
69. Drage, G., Vaughan, C., Henderson, K., Parsons, J. & Hiorns, T., The influence of freesheet and groundwood basepaper formation on coated and printed paper properties. Tappi 1999 Coating conference. Toronto, Canada, May 2-5, 1999. TAPPI Press, Atlanta, GA, 1999, s. 469-479.
70. Hua, X., Tanguy, P.A., Li, R., & van Wagner, J.S., Effect of basestock formation on paper coating. Tappi J. 79(1996)5, s. 112-115.
71. Hietanen, S., Woodfree base paper. Pigment Coating and Surface Sizing of Paper, Toim. Lehtinen, E., Julk. Fapet, Helsinki, 2000, s. 46-59.

72. Kajanto, I., Laamanen, J. & Kainulainen, M., Paper bulk and surface. Paper Physics, Toim. Niskanen, K., Julk. Fapet, Helsinki, 1998, s. 88-115.
73. Engström, G., Formation and consolidation of a coating layer and the effect on offset-print mottle. Tappi J., 77(1994)4, s. 160-172.
74. Oittinen, P. & Saarelma, H., Mechanical printing. Printing, Toim. Oittinen, P. & Saarelma, H., Julk. Fapet, Helsinki, 1998, s. 132-171.
75. Lyne, M.B., Multidimensional scaling of print quality. Tappi J. 62(1979)11, s. 103-107.
76. Suokas, P., Oy Keskuslaboratorio - Centrallaboratorium Ab, julkaisematon seloste, 1992.
77. Bernie, J.-P. & Douglas M., Exploration Of The Print Quality - Paper Formation Relation. Tappi 1997 Process & Product Quality Conference & Trade Fair. Jacksonville, FL, September 28 - October 3, 1997. TAPPI Press, Atlanta, GA, 1997, s. 73-77.
78. Kajanto, I.M., The effect of formation on print quality with woodfree offset papers. Nord. Pulp Pap. Res. J. 4(1989)1, s. 8-15.
79. Kajanto, I.M., Pointwise dependence between local grammage and local print density. Pap. Puu 73(1991)4, s. 338-345.
80. Bery, Y., Davis, B. & Mallory, W., Structural printability of coated board. Tappi J. 74(1991)12, s. 92-98.
81. Plowman-Sandreuter, N., Predicting print mottle: a method of differentiating between three types of mottle. Tappi J., 77(1994)7, s. 173-184.
82. Oittinen, P. & Saarelma, H., Paper in printing. Printing, Toim. Oittinen, P. & Saarelma, H., Julk. Fapet, Helsinki, 1998, s. 212-255.
83. Mäkinen, J., Rajala, P. & Nuyan, S., Optimization of drying of coated paper by means of automation. Tappi 1998 Coating/Papermakers conference. New Orleans, LA, May 4-6, 1998. TAPPI Press, Atlanta, GA, 1998, s. 159-66.
84. Engström, G., Morin, V. & Lin Bi, S., Analysis of porosity distribution in coating layers. Tappi J. 80(1997)5, s. 203-209.

85. Xiang, Y. & Bousfield, D.W., The cause of backtrap mottle: chemical or physical? Tappi 2000 Coating conference. Washington, DC, May 1-4, 2000. TAPPI Press, Atlanta, GA, 2000, s. 45-58.
86. Rajala, P., Päällysteen kuivatuksen vaikutus LWC:n laatuun, Lisensiaatintyö. Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan osasto, Espoo, 2001, 73 s.
87. Aschan, P.-J., Solving problems of print mottle on coated board. Tappi 1986 Coating conference. Washington, DC, May 4-7, 1986. TAPPI Press, Atlanta, GA, 1986, s. 73-78.
88. Laitinen, P., Koesuunnittelun perusmenetelmät. Vantaa 1994. Metsäteollisuuden Koulutuskeskus, Julkaisu P900701/94, Tehdaskoeajot paperi- ja kartonkitehtaassa. 19 s.
89. Montgomery, D.C., Design and analysis of experiments, 5. painos, John Wiley & Sons, New York, 2001, 684 s.
90. Milton, J.S. & Arnold, J.C., Introduction to probability and statistics: principles and applications for engineering and the computing sciences, 3. painos, McGraw-Hill Book, Singapore, 1995, 811 s.
91. Anon., Imatran tehtaiden esittelymateriaali, Kartonkikone 2. Esite, Stora Enso Oyj, 2000, 11 s.
92. Anon., The PIX Pulp Benchmark Indexes. FOEX Indexes [viitattu 8.4.2002]. Saatavilla www-muodossa: < <http://www.foex.fi/pix.asp> >.
93. Attwood, B.W., Multi-Ply Forming. Pulp and Paper Manufacture, Paper Machine Operations, 3rd Edition, Volume 7, Toim. Thorp, B.A. & Kocurek, M.J., Julk. Joint Textbook Committee of the Paper Industry, Montreal, 1991, s. 237-259.

LIITTEET

Liite 1	Mittausmenetelmät
Liite 2	Koeajosuunnitelmat
Liite 3	Perälaatikoiden optimointikoeajon mittaustulokset ja ajo-olosuhteet
Liite 4	Ensocoat 230 g/m ² -koeajon mittaustulokset ja ajo-olosuhteet
Liite 5	Ensocoat 275 g/m ² -koeajon mittaustulokset ja ajo-olosuhteet
Liite 6	Päällystämättömän koeajon mittaustulokset ja ajo-olosuhteet
Liite 7	Kilpailijavertailun mittaustulokset

MITTAUSMENETELMÄT

LIITE 1 1(10)

Standardimenetelmät

Näytteiden ilmastointi	ISO 187:1990
Neliömassa	ISO 536:1995
Paksuus, tiheys ja bulkki	ISO 534:1988
Kosteus	ISO 287:1985
Vedenabsorptio (Cobb)	SCAN-P 12:64
Taivutusjäykkyys (L&W)	SCAN-P 29:95
Bendtsen-sileys	SCAN-P 21:67
PPS-sileys	ISO 8791-4/1992
Kiilto	T 480 om-99
Vaaleus	SCAN-P 3:93
Opasiteetti	ISO 2471:1998
Värisävy	SCAN-P 72:95
IGT-palstautumisluku	SCAN-P 63:90
IGT-nukkaantuminen	SCAN-P 63:90
Palstautumisluku	T 569 pm-00
Puhkaisuluku (Mullen)	SCAN-P 25:81
K&N värinabsorptiokyky	TAPPI UM 553
K&N huokoisuus	TAPPI UM 553
Käyritymä	ISO 11556:1998
Vetolujuus, venymä ja kimmokerroin	SCAN-P 67:93
Huokoisuus (Gurley-Hill)	SCAN-P 19:78
Sakeus	SCAN-C 17:64
Kuidunpituus (FiberLab)	T 271 om-98

Muut menetelmät

Formaation mittaaminen Ambertec Beta Formation Tester -laitteella	2(10)
Polttopeittävyysmenetelmä (KCL, Espoo)	3(10)
Prescale-menetelmä (VTT Prosessit, Jyväskylä)	4(10)
Absorption testaus Bristow Wheel -laitteella	6(10)
Profiilin aritmeettisen poikkeaman määrittäminen profilometrillä	7(10)
Arkkioffset-painatus	8(10)
Painojäljen visuaalinen arviointi	9(10)
Painojäljen laikuillisuuden (mottling) mittaaminen	9(10)
Atomivoimamikroskooppitarkastelu (TKK, Espoo)	10(10)

FORMAATION MITTAUS AMBERTEC BETA FORMATION TESTER -LAITTEELLA

Ambertec Beta Formation Testerin toiminta perustuu suoraan β -säteilyn absorptiomittaukseen. Mitattavan paperiarkin alapuolella on β -säteilylähde (Prometium - 147-isotooppi, nimellisaktiivisuus 1 ... 8 mCi) ja arkin yläpuolella on säteilyn anturina toimiva tuikelaskuri. Säteily kohdistetaan arkkiin messinkisen kollimaattorin avulla, jonka aukon läpimitta on 1 mm. Mitattavaa näytettä liikutetaan mittausaukossa askeltaen. Näyte on siten aina mittaushetkellä paikallaan liikkuen vain mittauksen välillä.

Kustakin pisteestä mittausaikana näytteen läpi tulleet pulssimäärät taltioidaan mittaustietokoneen muistiin laskentaa varten. Mittaustietokone ohjaa myös näytteen liikutusta ja pulssilaskentaa. Laskenta-aika sekä mittauspinta-alaan ja pisteiden lukumäärään liittyvät parametrit ovat tarvittaessa helposti käyttäjän muuteltavissa. Kasvattamalla laskenta-aikaa voidaan mitata myös hyvin raskaita näytteitä (jopa 300 g/m^2).

Formaatio mitattiin Stora Enson Imatran tutkimuskeskuksessa sekä koko kartongista että erikseen kaikista kolmesta kerroksesta. Kerrokset saatiin erotettua toisistaan liottamalla niitä vedessä, jonka jälkeen kerrokset erotettiin varovaisesti repimällä. Repimisen onnistumista seurattiin visuaalisesti ja repiminen uusittiin tarvittaessa. Näytteet kuivattiin ennen mittauksia. Seuraavassa luettelossa on esitetty formaatiomittauksessa käytetyt parametrit.

Mittausalue	57 mm x 66,5 mm
Mittauspisteitä	400 kpl
Askelpituus	3,5 mm x- ja y-suunnassa (mittauspisteitä 20 kpl x 20 kpl)
Pulssien laskenta-aika	koko kartonki 1s erilliset kerrokset 0,5 s
Rinnakkaismääritykset	15 kpl koko kartongista (27 cm välein etulaidasta alkaen) 4 kpl erillisistä kerroksista (1 kpl etulaidasta, 2 kpl keskeltä rataa, 1 kpl takalaidasta)

Mittaustietokone muuntaa kustakin pisteestä mitatut pulssimäärät todelliseksi neliömassa-arvoiksi ja laskee jokaisesta rinnakkaisnäytteestä neliömassan keskihajonnan ja normeeratun neliömassahajonnan.

Polttopeittävyyskuvat antavat havainnollista informaatiota päällysteen peittävydestä ja päällystemäärän vaihtelusta suurehkolta alalta kerrallaan (15 cm x 20 cm). Kuvista voidaan tehdä havaintoja myös päällysteen rakenteesta, raekoosta, peittävyiden jaksottaisuudesta ja päällystevanoista. Tutkimuksissa on myös havaittu, että polttopeittävyyskuvien päällystekerroksen tasaisuus on ollut huonointa niillä näytteillä, joilla on ollut laikullisin painojälki. Etenkin mittakaavassa 1-10 mm havaittu päällysteen epätasaisuus on kuvannut hyvin mottlingia.

Oy Keskuslaboratorio - Centrallaboratorium Ab:n (KCL) soveltamassa polttopeittävyysmenetelmässä päällystetyn arkin annetaan saturoitua ammoniumkloridi-isopropanoli -liuoksessa (25 g/l ammoniumkloridia 1:1 vesi-isopropanoli -liuoksessa) kahden minuutin ajan, minkä jälkeen näytteen annetaan kuivua yön yli huoneenlämpötilassa. Kuivaa näytettä käsitellään lämpökaapissa 210 °C lämpötilassa 15 minuutin ajan. Lämpökäsittelyssä kuidut tummenevat ja päällyste jää vaaleaksi. Vaalean päällystekerroksen peittävyttä voidaan näin tarkastella visuaalisesti tai käyttämällä apuna kuva-analyysiä. Päällysteen raaka-ainekoostumus vaikuttaa kuvien sävyyn, mikä voi haitata erilaisten päällysteiden visuaalista tarkastelua.

KCL:ssä käsitellyt polttopeittävyysarkit mitattiin Stora Enson Falunin tutkimuskeskuksessa Teragon-kuvanlukijalla tarkkuudella 0,005 mm/kuvapistete. Mittausala oli 60 mm x 100 mm (1200 kuvapistettä x 1200 kuvapistettä). Kuva-analyysiohjelma jakoi näytteistä määritetyn varianssin kahdeksalle eri aallonpituusalueelle flokkikoon mukaisesti (taulukko 17). Polttopeittävyysmenetelmän tuloksena ilmoitettiin aallonpituusalueiden 4,5 ja 6 varianssien summa.

Taulukko 17. Polttopeittävyysmenetelmän flokkikoon aallonpituusalueiden rajat.

Alue	Flokkikoko (mm)
0	0-0,13
1	0,13-0,27
2	0,27-0,53
3	0,53-1,06
4	1,06-2,12
5	2,12-4,24
6	4,24-8,48
7	> 8,48

Lisätietoja polttopeittävyysmenetelmästä:

Heikkonen, T., Asikainen, J., Juvonen, K., Kivikangas, K. & Zabihian, M., Oy Keskuslaboratorio - Centrallaboratorium Ab, julkaisematon seloste, 2001.

O' Neill, M. & Jordan, B., The burnout test revisited. J. Pulp Pap. Sci. 26(2000)4, s. 131-134.

Engström, G., Morin, V. & Bi, S.L., Analysis of porosity distribution in coating layers. Tappi J., 80(1997)5, s. 203-209.

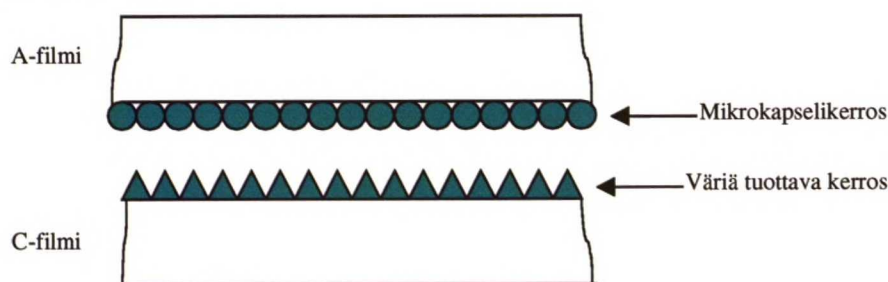
Dobson, R.L., Burnout, a coat weight determination test re-examined. Tappi 1975 Coating conference. Chicago, IL, April 21-23, 1975. TAPPI Press, Atlanta, GA, 1974, s. 123-131.

PRESCALE-MENETELMÄ

Prescale-menetelmässä mitattiin paineherkän filmin avulla nipissä tapahtuvan kartongin kokoonpuristumisen tasaisuutta. Mittauksessa filmi syöttiin yhdessä kartonkinäytteen kanssa laboratoriokalanterin kahden terästelan väliseen nippiin. Filminä käytettiin Fujin Pressurex LOW-filmiä, jonka painealue on 25 - 100 kg/cm². Kartongin kontaktin vaihtelu nipissä aiheutti filmissä värin densiteetin vaihtelua. Värjäytynyt filmi skannattiin kuvanlukijalla 300 dpi:n erotelutarkkuudella ja tallennettiin analyysiä varten 8-bittisenä pakkaamattomana tiff-kuvana. Filmistä oli puristinkoelaitteessa tehty kalibrointikäyrä, jonka avulla punaisen sävy muutettiin vastaamaan painetta.

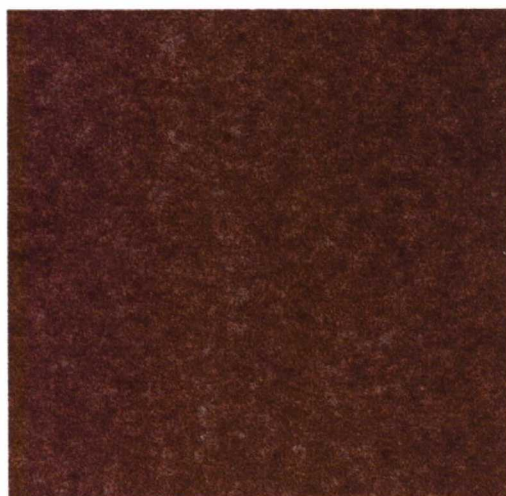
Kustakin näytteestä mitattiin Jyväskylässä VTT Prosessit -tutkimuslaitoksessa kaksi erillistä arkkiä. Filmistä leikattiin noin 100 mm x 200 mm kokoinen liuska, josta saatiin kaksi 100 mm x 100 mm kokoista kuvaa. Kuvissa pystysuora suunta vastasi A4-kokoisen näytteen pitkän sivun suuntaa (konesuunta). Kuvista laskettiin erilaisia paineen tasaisuutta sekä kuvissa näkyvien flokkien kokoa kuvaavia tunnuslukuja, joista on raportoitu jokaiselle koepisteelle keskiarvo sekä pituuspainotettu flokkikoko x- ja y-suunnassa. Tulokset laskettiin painekalibroimattomille kuville. Mittaustuloksissa esiintyvä vinous poistettiin laskennallisesti jättämällä huomioimatta aallonpituudeltaan yli 30 mm vaihtelu.

Prescale-filmi koostuu kahdesta erilaisesta kalvomateriaalista, A- ja C-filmistä. A-filmi sisältää mikrorakenteisen kerroksen väriä sisältävää materiaalia ja C-filmissä on kerros väriä tuottavaa materiaalia. Tietyllä painealueella A-filmin mikrokapselit rikkoutuvat ja väriä muovaava materiaali vapautuu. Tämä materiaali absorboi itseensä väriä tuottavan C-filmin materiaalia. Reaktion seurauksena C-filmiin muodostuu väriä. Paineen lisäksi lämpötila ja kosteus vaikuttavat densiteettiin. Kuvassa 72 on esitetty prescale-filmin rakenne.



Kuva 72. Prescale-filmin rakenne.

Kovalla nipillä tehdyt testaukset ovat antaneet formaation kaltaisia densiteettikuvia. Tulokset ovat olleet myös riittävän tasalaatuisia. Kuvassa 73 on esimerkkikuva kovassa nipissä kalanteroidusta näytteestä.



Kuva 73. Kartongin pinnan prescale-kuva.

Lisätietoja prescale-menetelmästä:

Anon., Nip Impression. Sensor Products [viitattu 19.4.2002]. Saatavilla www-muodossa: < http://www.fuji-prescale.com/nip_impression.html >.

Bristow Wheel -mittausmenetelmällä voidaan mitata kartongin absorptiokykyä lyhyellä aikavälillä. Mittaustuloksen voidaan katsoa kuvaavan näytteen pintakarheustilavuutta. Mittaus perustuu tunnetun nestemäärän saattamiseen kosketuksiin pyörivän pyörän päällä olevan näyteliuskan kanssa. Neste absorboituu paperille nestesäiliön pohjassa olevan raon kautta. Nestejäljen pituus kuvaa paperin absorptiota.

Ilmastoiduista näytteistä leikataan konesuuntaan 25 mm x 1000 mm kokoisia liuskoja. Näyteliuskat teipataan näyteliuska myötäpäivään pyörivän pyörän päälle. 20 µl Amarantilla värjättyä vettä annostellaan mikropipetillä nestesäiliöön. Pyörän pyörimisnopeus asetetaan halutuksi säätöruuvista. Yleisesti käytetyt pyörimisnopeudet ovat 0,025 cm/s, 0,050 cm/s ja 0,075 cm/s. Pyörä käynnistetään, ja pysäytetään, kun kaikki neste on absorboitunut näyteliuskalle. Jäljen alkamis- ja loppumiskohta merkitään ja jäljen pituus mitataan.

Absorboitunut nestemäärä A voidaan laskea kaavalla

$$A = \frac{1000 * V}{l * w}, \quad (14)$$

missä A on absorptio (ml/m²),
 V on nestemäärä (ml),
 l on jäljen pituus (mm) ja
 w on jäljen leveys (mm).

Kontaktiaika voidaan puolestaan laskea kaavasta

$$T = \frac{d}{v}, \quad (15)$$

missä T on kontaktiaika (s),
 v on pyörimisnopeus (cm/s) ja
 d on raon leveys (cm).

Tulokset lasketaan kolmen rinnakkaismittauksen tuloksista. Absorptio ja kontaktiaika ilmoitetaan yhden desimaalin tarkkuudella.

Bristow Wheel -määritykset suoritettiin Stora Enson Imatran tutkimuskeskuksessa.

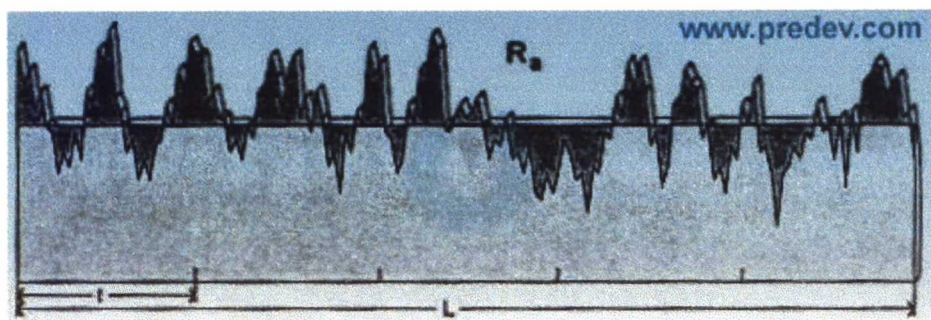
PROFIILIN ARITMEETTISEN POIKKEAMAN MÄÄRITYS PROFILOMETRILLA

Profiilin aritmeettinen poikkeama määritettiin Stora Enson Imatran tutkimuskeskuksen Rodenstock RM-600 3-D/C -profilometrillä, joka on optinen (laser-)profilometri. Laitteessa käytetyn infrapunalaserasäteen halkaisija on $1\ \mu\text{m}$ ja aallonpituus $790\ \text{nm}$. Lasersäde-anturin tyyppi on LS10, jonka etäisyys paperin pinnasta mittauksen aikana on noin $10\ \text{mm}$. Erottelutarkkuus tällä anturilla on $0,002\ \mu\text{m}$ z-suunnassa.

Näytteen mittaus tapahtuu fokusoimalla lasersäde paperin pintaan. Etäisyys pinnasta tunnistetaan fokuskontrollijärjestelmän induktiivisella siirtojärjestelmällä. Anturista saadaan analoginen etäisyys-viesti, joka viedään tietokoneelle käsiteltäväksi. Mitattavaa näytettä liikutetaan xy-pöydällä mittauspisteiden välillä.

Mittauksessa käytetty mittausalue oli z-suunnassa $\pm 300\ \mu\text{m}$, jolloin z-suuntaiseksi erottelutarkkuudeksi saatiin $<0,02\ \mu\text{m}$. Mittauspisteitä oli $8000\ \text{kpl}$ $10\ \mu\text{m}$ välein $80\ \text{mm}$ pitkällä poikkisuuntaisella mittausviivalla.

Profilometrimittauksen tulos ilmoitetaan tavallisesti profiilin aritmeettisena poikkeama eli R_a -arvona, joka voidaan laskea integroimalla profiilikarheuden absoluuttinen poikkeama keskiarvosta katkaisupituuden (cut-off) yli. R_a -arvo kuvaa profiilikarheuden ja sen keskiarvon väliin jäävää pinta-alaa (tummennettu kuvassa 74).



Kuva 74. Profiilin aritmeettinen poikkeama.

Lisätietoja profilometrimenetelmästä:

Anon., Surface Metrology Guide - Profile Parameters. Precision Devices [viitattu 19.4.2002]. Saatavilla [www-muodossa: < http://www.predev.com/smg/parameters.htm >](http://www.predev.com/smg/parameters.htm).

Arkkioffset-painatukset suoritettiin Stora Enson Kaukopään tehtailla tuotantomittakaavaisella painokoneella. Käytetyt painatusmuuttujat on esitelty tarkemmin alla olevassa luettelossa. Kaikki näytteet painettiin samalla kertaa painokoneesta ja painatusolosuhteista riippuvan vaihtelun minimoimiseksi.

Painokone	M.A.N.-Roland Favorit RVF 0B		
Kostutusvesi	vesi	92 %	
	isopropanoli	5 %	
	lisäaine Aqualine XA	3 %	
Painovärit	1. ryhmä	musta	Sicpa Tempo Max
	2. ryhmä	syaani	Sicpa Tempo Max
	3. ryhmä	magenta	Lotus LTS 27
	4. ryhmä	keltainen	Lotus LTS 26
Kumikankaat	Vulcan Image		
Painolevyt	Fuji VPL-E		
Painatusnopeus	7000 arkkia/h		
Infrapunakuivatus	ei käytössä		
Set-off -pulveri	ei käytössä		

Testipainon laborantti suoritti painojäljen visuaalisen arvioinnin yhdessä painajan ja testipainoteknikon kanssa. Visuaalista arviointia käytetään rutiininomaisesti kartonkikone 2:n laadun valvontaan. Näytteet arvostellaan asteikolla 1-5, jossa arvosana 1 edustaa laadultaan parasta ja arvosana 5 laadultaan huonointa painojälkeä. Asteikko on sovitettu kartonkikone 2:n tuotannon seuraamiseen siten, että normaali painojäljen laatu vaihtelee välillä 2-3.

Arvion suorittamisessa käytetään apuna eri arvosanoja kuvaavia malliarkkeja. Painatuksen yhteydessä painetaan myös referenssiarkki, jonka tarkoituksena on sulkea pois mahdolliset painokoneesta tulevat poikkeamat. Referenssiarkkeina käytetään normaalista tuotannosta poimittuja arkkeja.

Parittaisvertailu toteutettiin siten, että jokaista painettua koepistettä verrattiin pareittain kaikkiin saman koeajon muihin koepisteisiin ja merkittiin ylös näytteistä se, jonka painojälki oli parempi. Parittaisvertailu suoritettiin keskeltä poikkirataa otetuista arkeista satunnaisvaihtelun minimoimiseksi. Menetelmän subjektiivisesta luonteesta johtuva hajonta eliminoitiin mediaanin avulla. Näytteen arvostelutulos oli siten näytteen saamien mainintojen määrän mediaani kerrottuna kolmella.

PAINOJÄLJEN LAIKULLISUUDEN (MOTTLINGIN) MITTAUS

Mottling mitattiin ONLY Solutions GmbH -yhtiön valmistamalla PapEye Mottling-Test -laitteella. Laitteisto koostuu tietokoneesta ja tasokuvanlukijasta. Painettu näyte skannataan tietokoneelle ja siitä lasketaan yksi tunnusluku, joka valmistajan mielestä on riittävä kuvaamaan painojäljen laikullisuuden voimakkuutta ja hajontaa. Laitteisto on vielä prototyyppiasteella, eikä valmistaja suostunut antamaan tarkempaa tietoa tunnusluvun laskennasta.

Mottling-arvo mitattiin Stora Enson Imatran tutkimuskeskuksessa koepisteittäin viidestä rinnakkaisesta, keskeltä poikkirataa otetusta ja testipainossa painetusta näytearkista. Näytettä kuvaavaksi mottling-arvoksi valittiin näiden viiden näytteen mittauksien mediaani eli keskimäinen arvo. Suuri mottling-arvo kuvaa laikukasta painojälkeä.

Atomivoimamikroskoopilla saadaan tietoa nano- ja mikrometrimittakaavassa pinnan rakenteesta ja topografiasta. Pinnan koostumuksen, adheesio-ominaisuuksien, kitkan ja viskoelastisuuden vaihtelua voidaan tarkastella.

Atomivoimamikroskooppia voidaan käyttää paperin ja kuitujen pintarakenteen tutkimiseen. Erityissovellutus tällä alalla on kuitujen mikrofibrillirakenteen tutkimus. Pintaan adsorboituneita aineita voidaan analysoida. Atomivoimamikroskooppi soveltuu hyvin myös päällysteen tutkimukseen. Päällysteen mikrokärheyttä voidaan tutkia ja päällysteen eri komponenttien sijaintia voidaan kartoittaa.

Laitteella voidaan mitata näytteitä joko ilmassa tai nesteessä. Mittausmenetelmiä ovat mm. kontakti- ja kitkamoodi sekä värähtelyyn perustuva tapping-moodi. Nk. faasimoodi on tapping-moodin laajennus. Kun värähtelevä kärki tuodaan kontaktiin pinnan kanssa, muuttavat vuorovaikuttavat voimat kärjen efektiivistä jousivakiota ja siten kärjen resonanssitaajuutta. Tämä vaikuttaa edelleen vaihekulmaan, joka muuttuu. Vaihe-ero on verrannollinen pinnan jäykkyyteen, joka puolestaan on verrannollinen efektiiviseen elastiseen kimmokertoimeen ja kärjen pinnan kontaktialaan.

Atomivoimamikroskooppimääritykset suoritettiin Teknillisen korkeakoulun Puunjalostustekniikan osastolla Digital Instruments Inc. -yhtiön valmistamalla NanoScope IIIA Multimode -laitteistolla. Näytteen koko saa olla korkeintaan 1 cm x 1 cm x 0,5 cm. Näytteen pinnan tulee olla suhteellisen tasainen, sillä atomivoimamikroskoopin z-suuntainen liike on maksimissaan n. 5 mikrometriä. Pyyhkäisyalue voidaan valita portaattomasti väliltä 1 nm x 1 nm 200 µm x 200 µm. Mitattavan näytteen tulee olla puhdas ja vahingoittumaton. Erotuskyky on tyypillisesti x- ja y-suunnissa 0,1 - 3,0 nm ja z-suunnassa parhaimmillaan 0,01 nm.

KOEAJOSUUNNITELMAT

Perälaatikoiden hallintasuureiden optimointikoeajo

Ensocoat 230 g/m ²	Konerulla	Faktori 1: Suihku- suhde	Faktori 2: Huuliauukko	Faktori 3: Huuliero	Pinta ja tausta: Suihku- suhde	Pinta ja tausta: Huuliauukko mm	Pinta ja tausta: Huuliero mm	Runko: Suihku- suhde	Runko: Huuliauukko mm	Runko: Huuliero mm
Koepiste 1	5265	-1	-1	-1	1,01	28,0	9,0	1,02	43,5	11,0
Koepiste 2	5266	-1	0	+1	1,01	30,0	15,0	1,02	45,5	17,0
Koepiste 3	5267	-1	+1	0	1,01	32,0	12,0	1,02	47,5	14,0
Koepiste 4	5268	0	-1	+1	1,03	28,0	15,0	1,04	43,5	17,0
Koepiste 5	5269	0	0	0	1,03	30,0	12,0	1,04	45,5	14,0
Koepiste 6	5270	0	+1	-1	1,03	32,0	9,0	1,04	47,5	11,0
Koepiste 7	5271	+1	-1	0	1,05	28,0	12,0	1,06	43,5	14,0
Koepiste 8	5272	+1	0	-1	1,05	30,0	9,0	1,06	45,5	11,0
Koepiste 9	5273	+1	+1	+1	1,05	32,0	15,0	1,06	47,5	17,0

Ensocoat 230 g/m² -koeajo formaation parantamiseksi

Ensocoat 230 g/m ²	Konerulla	Faktori 1: Koivuosuus	Faktori 2: Neliömassa	Runko: Koivuosuus %	Runko: Neliömassa g/m ²
Koepiste 1	6053	-1	+1	70	131
Koepiste 2	6054	-1	0	70	121
Koepiste 3	6055	-1	-1	70	111
Koepiste 4	6056	0	-1	85	111
Koepiste 5	6057	0	0	85	121
Koepiste 6	6058	0	+1	85	131
Koepiste 7	6059	+1	+1	100	131
Koepiste 8	6060	+1	0	100	121
Koepiste 9	6061	+1	-1	100	111
Koepiste 10*	6062	-1	+1	70	131

*) Koepiste 1:n toistokoe

Ensocoat 275 g/m² -koeajo formaation parantamiseksi

Ensocoat 275 g/m ²	Konerulla	Faktori 1: Koivuosuus	Faktori 2: Neliömassa	Runko: Koivuosuus %	Runko: Neliömassa g/m ²
Koepiste 1	6153	-1	+1	70	157
Koepiste 2	6154	-1	0	70	145
Koepiste 3	6155	-1	-1	70	133
Koepiste 4	6156	0	-1	85	133
Koepiste 5	6157	0	0	85	145
Koepiste 6	6159	0	+1	85	157
Koepiste 7	6160	+1	+1	100	157
Koepiste 8	6161	+1	0	100	145
Koepiste 9	6162	+1	-1	100	133
Koepiste 10*	6163	-1	+1	70	157

*) Koepiste 1:n toistokoe

Päällystämätön koeajo

Ensocoat 230 g/m ²	Konerulla	Muuttuja: Pinta- ja tausta: Perälaatikoiden sakeus %
Koepiste 1	0840	0,22
Koepiste 2	0841	0,19
Koepiste 3	0842	0,16
Koepiste 4*	0843	0,16

*) Koepiste 3 päällystettynä

PERÄLAATIKOIDEN OPTIMOINTIKOEAJON MITTAUSTULOKSET JA AJO-OLOSUHTEET (18.10.2001 KLO 7.30-19.00)

Koepisteissä toteutuneet hallintasuureiden arvot

Ensocoat 230 g/m ²	Konerulla	3-pl suihkusuhde	2-pl suihkusuhde	1-pl suihkusuhde	3-pl huuliauukko mm	2-pl huuliauukko mm	1-pl huuliauukko mm	3-pl huuliero mm	2-pl huuliero mm	1-pl huuliero mm
Referenssi	5263	1,020	1,052	1,041	31,5	45,2	29,5	12,5	2,9	10,5
Koepiste 1	5265	1,015	1,019	1,013	27,3	44,5	27,5	9,0	11,0	9,0
Koepiste 2	5266	1,016	1,020	1,013	29,0	46,3	27,2	15,0	17,0	15,0
Koepiste 3	5267	1,016	1,021	1,013	31,3	48,2	29,0	12,0	14,0	12,0
Koepiste 4	5268	1,037	1,040	1,033	26,9	44,2	25,3	15,0	17,0	15,0
Koepiste 5	5269	1,036	1,039	1,034	28,7	46,7	26,5	12,0	14,0	12,0
Koepiste 6	5270	1,037	1,040	1,033	30,7	48,5	28,9	9,0	11,0	9,0
Koepiste 7	5271	1,054	1,060	1,052	27,2	44,5	25,3	12,0	14,0	12,0
Koepiste 8	5272	1,055	1,061	1,053	29,1	46,4	26,7	9,0	11,0	9,0
Koepiste 9	5273	1,055	1,061	1,053	31,1	48,6	29,0	15,0	17,0	15,0

Formaation mittaustulokset

Ensocoat 230 g/m ²	Konerulla	Koko kartonki: hajonta g/m ²	norm. hajonta √g/m	Pinta: hajonta g/m ²	norm. hajonta √g/m	Runko: hajonta g/m ²	norm. hajonta √g/m	Tausta: hajonta g/m ²	norm. hajonta √g/m
Referenssi	5263	7,54	0,497	2,96	0,388	6,06	0,516	3,29	0,503
Koepiste 1	5265	9,14	0,596	3,30	0,430	8,68	0,737	3,11	0,474
Koepiste 2	5266	9,08	0,596	3,40	0,450	8,77	0,746	3,17	0,488
Koepiste 3	5267	8,16	0,536	2,99	0,391	7,90	0,670	2,94	0,454
Koepiste 4	5268	8,33	0,548	3,47	0,456	7,71	0,647	3,32	0,509
Koepiste 5	5269	7,89	0,519	3,26	0,426	7,01	0,597	3,34	0,514
Koepiste 6	5270	7,48	0,493	3,26	0,426	5,66	0,484	3,15	0,480
Koepiste 7	5271	8,58	0,562	3,25	0,429	7,21	0,611	3,82	0,581
Koepiste 8	5272	8,01	0,523	3,10	0,397	6,45	0,549	3,94	0,603
Koepiste 9	5273	7,71	0,506	3,19	0,416	5,61	0,477	3,76	0,573

Mittaustulokset

Ensocoat 230 g/m ²	Kone- rulla	Neliöpaino g/m ²	Tiheys kg/m ³	Kosteus %	Paksuus µm	Jäykkyys kone- suunta kN/m	Jäykkyys poikki- suunta kN/m	Jäykkyys- suhde KS/PS	Bendtsen- sileys pinta ml/min	Bendtsen- sileys tausta ml/min	PPS 10- sileys pinta µm	PPS 10- sileys tausta µm	Kiilto pinta %	Kiilto tausta %
Referenssi	5263	236,7	869	6,9	272	157	66	2,4	14	157	1,39	5,13	41,7	5,5
Koepiste 1	5265	236,6	862	7,0	273	143	75	1,9	28	197	1,42	5,17	41,8	5,6
Koepiste 2	5266	237,0	864	7,1	273	137	75	1,8	26	206	1,44	5,18	41,1	5,4
Koepiste 3	5267	236,1	863	6,9	272	134	74	1,8	23	182	1,47	5,18	40,8	5,4
Koepiste 4	5268	236,3	861	6,8	273	148	74	2,0	22	185	1,56	5,26	40,6	5,6
Koepiste 5	5269	236,3	862	6,9	273	142	71	2,0	22	176	1,51	5,16	40,7	5,4
Koepiste 6	5270	236,0	862	6,8	273	143	71	2,0	20	157	1,50	5,16	41,1	5,5
Koepiste 7	5271	235,3	859	6,8	274	157	66	2,4	20	178	1,50	5,13	40,6	5,5
Koepiste 8	5272	236,2	864	6,9	273	159	65	2,4	17	168	1,46	5,18	40,9	5,4
Koepiste 9	5273	235,8	868	6,8	273	153	65	2,4	16	167	1,51	5,23	40,8	5,3

Prosessimittaukset

Ensocoat 230 g/m ²	Kone- rulla	3-pl sakeus %	2-pl sakeus %	1-pl sakeus %	3-pl ulosvir- taus l/s	2-pl ulosvir- taus l/s	1-pl ulosvir- taus l/s	3-pl paine mm(H ₂ O)	2-pl paine mm(H ₂ O)	1-pl paine mm(H ₂ O)	Massan paino ennen SymFormeria kg/m ²	Pinnan esipäällystys (2-asema) g/m ²	Taustapig- mentointi (3-asema) g/m ²	Pinnan pinta- päällystys (4-asema) g/m ²
Referenssi	5263	0,154	0,345	0,182	849	1286	883	1662	1738	1739	7,1	7,9	3,6	9,9
Koepiste 1	5265	0,183	0,372	0,199	724	1188	818	1655	1635	1643	6,1	8,4	3,4	9,9
Koepiste 2	5266	0,174	0,360	0,207	760	1226	787	1656	1635	1643	6,3	7,6	3,8	9,5
Koepiste 3	5267	0,153	0,347	0,188	837	1292	849	1655	1628	1643	7,4	8,0	3,6	9,8
Koepiste 4	5268	0,182	0,370	0,217	712	1190	748	1728	1705	1716	6,0	8,1	3,7	9,7
Koepiste 5	5269	0,165	0,347	0,205	771	1270	794	1728	1698	1719	7,1	7,7	3,8	9,8
Koepiste 6	5270	0,151	0,336	0,183	846	1333	882	1727	1690	1711	7,9	7,9	3,8	9,5
Koepiste 7	5271	0,176	0,360	0,214	742	1226	777	1795	1770	1784	6,2	7,6	3,6	9,7
Koepiste 8	5272	0,159	0,342	0,196	807	1292	830	1794	1770	1784	6,9	7,7	3,6	9,8
Koepiste 9	5273	0,149	0,328	0,186	851	1350	879	1785	1766	1781	7,6	8,2	3,8	9,7

Ajo-olosuhteet koeajon aikana 18.10.2001 klo 7.30-19.00

Ensocoat 230 g/m²			
Massasuhteet pinta/tausta	Koivu	70	%
	Mänty	30	%
Massasuhteet runko	Koivu	70	%*
	Mänty	30	%*
	Hylky	40	%*
Jauhatusaste pinta/tausta	Koivu	21	° SR
	Mänty	28	° SR
Jauhatusaste runko	Koivu	18	° SR
	Mänty	15	° SR
	Hylky	25	° SR
Kerrosneliöpaino	Pinta	45	g/m ²
	Runko	126	g/m ²
	Tausta	45	g/m ²
Retentiotäikkelys	Pinta	1,5	kg/t
	Runko	2,3	kg/t
	Tausta	1,5	kg/t
Retentioaine	Pinta	0,3	kg/t
	Runko	0,3	kg/t
	Tausta	0,3	kg/t
Neutraaliliima	Pinta	0,6	kg/t
	Runko	0,7	kg/t
	Tausta	0,6	kg/t
Viiraosan nopeus		350	m/min
1-puristimen kuormitus		45	kN/m
2-puristimen kuormitus		61	kN/m
3-puristimen kuormitus		37	kN/m
Tasauspuristimen kuormitus		27	kN/m
Pintaliiman väkevyys liima/vesi		8,0	%
1-kalanterin kuormitus		24	kN/m
1-kalanterin lämpötila		80	° C
Soft-kalanterin kuormitus		82	kN/m
Soft-kalanterin lämpötila		125	° C
Rullaimen nopeus		359	m/min

*) runkokerroksen massasuhteet lasketaan prosentteina neitseellisen kuidun määrästä

ENSOCOAT 230 G/M² -KOEAJON MITTAUSTULOKSET JA AJO-OLOSUhteet (7.12.2001 KLO 10.30-21.30)

Koepisteissä toteutuneet hallintasuureiden arvot

Ensocoat 230 g/m ²	Konerulla	Runkokerroksen koivuosuus %	Runkokerroksen neliömassa g/m ²	Pintakerroksen neliömassa g/m ²	Taustakerroksen neliömassa g/m ²	2-pl sakeus %	3-pl ulosvirtaus l/s	1-pl ulosvirtaus l/s
Referenssi	6052	70	131,9	41,1	41,0	0,371	842	847
Koepiste 1	6053	70	131,4	41,2	41,1	0,368	840	829
Koepiste 2	6054	70	118,9	47,1	47,1	0,357	882	904
Koepiste 3	6055	70	108,4	51,8	52,3	0,327	1017	993
Koepiste 4	6056	85	107,8	51,8	52,7	0,321	1014	1003
Koepiste 5	6057	85	119,5	46,9	47,0	0,351	932	966
Koepiste 6	6058	85	127,8	42,7	42,7	0,371	796	800
Koepiste 7	6059	100	126,0	43,4	43,4	0,377	784	794
Koepiste 8	6060	100	118,3	47,2	47,2	0,364	831	843
Koepiste 9	6061	100	109,1	51,8	51,9	0,334	1011	1014
Koepiste 10	6062	70	127,1	43,0	43,0	0,371	842	847

Formaation mittaustulokset

Ensocoat 230 g/m ²	Konerulla	Koko kartonki: hajonta g/m ²	norm. hajonta √g/m	Pinta: hajonta g/m ²	norm. hajonta √g/m	Runko: hajonta g/m ²	norm. hajonta √g/m	Tausta: hajonta g/m ²	norm. hajonta √g/m
Referenssi	6052	7,51	0,488	3,29	0,443	6,08	0,508	3,95	0,634
Koepiste 1	6053	7,37	0,483	3,19	0,433	6,42	0,536	3,44	0,548
Koepiste 2	6054	7,51	0,493	3,20	0,413	5,57	0,482	3,50	0,523
Koepiste 3	6055	7,37	0,484	3,29	0,410	5,66	0,513	3,86	0,541
Koepiste 4	6056	7,15	0,470	3,31	0,413	5,32	0,477	3,52	0,496
Koepiste 5	6057	6,70	0,440	3,23	0,418	5,25	0,450	3,55	0,540
Koepiste 6	6058	6,76	0,438	3,15	0,426	5,80	0,476	3,43	0,566
Koepiste 7	6059	6,41	0,417	3,03	0,420	5,27	0,428	3,44	0,581
Koepiste 8	6060	6,32	0,414	3,06	0,403	4,81	0,406	3,62	0,561
Koepiste 9	6061	6,53	0,427	3,28	0,407	4,65	0,413	3,53	0,508
Koepiste 10	6062	7,04	0,461	3,16	0,421	6,01	0,505	3,39	0,534

Mittaustulokset

Ensocoat 230 g/m ²	Kone- rulla	Neliöpaino g/m ²	Tiheys kg/m ³	Kosteus %	Paksuus µm	Jäykkyys kone- suunta kN/m	Jäykkyys poikki- suunta kN/m	Jäykkyy- suhde KS/PS	Bendtsen- sileys pinta ml/min	Bendtsen- sileys tausta ml/min	PPS 10- sileys pinta µm	PPS 10- sileys tausta µm	Kiilto pinta %	Kiilto tausta %
Referenssi	6052	233,9	868	7,7	270	146	66	2,2	23	188	1,21	5,05	50,4	6,2
Koepiste 1	6053	234,6	871	7,6	269	146	67	2,2	21	196	1,22	5,08	51,1	6,1
Koepiste 2	6054	235,1	879	7,2	268	148	68	2,2	26	188	1,29	5,27	50,6	6,0
Koepiste 3	6055	233,7	878	7,0	267	152	73	2,1	22	171	1,30	5,29	50,2	5,8
Koepiste 4	6056	235,0	876	7,0	268	150	75	2,0	24	179	1,33	5,23	49,1	5,8
Koepiste 5	6057	236,2	879	7,4	269	145	70	2,1	28	176	1,31	5,19	49,1	5,8
Koepiste 6	6058	234,9	877	7,4	268	150	68	2,2	32	181	1,34	5,12	49,1	6,1
Koepiste 7	6059	234,0	877	7,2	266	145	71	2,0	35	192	1,41	5,23	48,9	6,0
Koepiste 8	6060	234,6	876	7,1	268	149	70	2,1	24	175	1,38	5,20	49,4	6,0
Koepiste 9	6061	236,9	881	7,1	269	152	72	2,1	19	167	1,33	5,23	49,3	5,9
Koepiste 10	6062	232,3	888	7,7	261	157	71	2,2	46	204	1,58	5,32	50,2	6,0

Prosessimittaukset 1(2)

Ensocoat 230 g/m ²	Kone- rulla	3-pl huuli- aukko mm	2-pl huuli- aukko mm	1-pl huuli- aukko mm	3-pl huuliero mm	2-pl huuliero mm	1-pl huuliero mm	3-pl sakeus %	2-pl sakeus %	1-pl sakeus %	3-pl ulosvir- taus l/s	2-pl ulosvir- taus l/s	1-pl ulosvir- taus l/s	3-pl paine mm(H ₂ O)	2-pl paine mm(H ₂ O)	1-pl paine mm(H ₂ O)
Referenssi	6052	30,1	45,9	29,3	11,8	12,2	11,0	0,165	0,371	0,164	842	1362	847	2038	2100	2112
Koepiste 1	6053	30,1	46,1	29,2	11,8	12,2	11,2	0,165	0,368	0,165	840	1379	829	2038	2126	2040
Koepiste 2	6054	31,4	46,1	31,7	13,1	12,3	14,0	0,171	0,357	0,168	882	1376	904	2032	2127	2039
Koepiste 3	6055	35,4	46,0	34,8	13,3	12,3	14,6	0,174	0,327	0,178	1017	1376	993	2033	2126	2033
Koepiste 4	6056	35,5	46,0	34,4	12,8	12,3	14,3	0,176	0,321	0,184	1014	1376	1003	2035	2126	2033
Koepiste 5	6057	33,0	46,0	33,6	13,2	12,3	14,1	0,166	0,351	0,161	932	1375	966	2027	2127	2038
Koepiste 6	6058	28,7	46,0	28,5	12,9	12,3	13,0	0,169	0,371	0,167	796	1376	800	2043	2127	2044
Koepiste 7	6059	28,3	46,1	28,2	12,0	12,3	13,0	0,170	0,377	0,165	784	1376	794	2044	2127	2044
Koepiste 8	6060	29,9	46,1	29,9	12,9	12,3	13,8	0,177	0,364	0,174	831	1376	843	2038	2126	2039
Koepiste 9	6061	35,4	46,0	35,2	13,9	12,3	14,9	0,172	0,334	0,172	1011	1376	1014	2031	2126	2027
Koepiste 10	6062	30,1	45,9	29,3	11,8	12,2	11,0	0,164	0,371	0,164	842	1362	847	2038	2100	2112

Prosessimittaukset 2(2)

Ensocoat 230 g/m ²	Konerulla	Massan paino ennen SymFormeria kg/m ²	Pinnan esi-päälylystys (2-asema) g/m ²	Tausta- pigmentointi (3-asema) g/m ²	Pinnan pinta- päälylystys (4-asema) g/m ²
Referenssi	6052	7,8	8,8	2,8	10,5
Koepiste 1	6053	7,8	9,1	3,2	10,7
Koepiste 2	6054	7,7	9,1	3,4	10,4
Koepiste 3	6055	6,6	9,5	3,4	10,2
Koepiste 4	6056	6,1	9,9	3,4	10,0
Koepiste 5	6057	7,4	10,0	3,4	9,9
Koepiste 6	6058	7,9	9,8	3,6	10,1
Koepiste 7	6059	8,3	10,1	3,8	10,0
Koepiste 8	6060	8,1	10,1	3,6	10,0
Koepiste 9	6061	7,1	9,8	3,6	10,1
Koepiste 10	6062	8,1	9,8	3,5	10,2

Pintaominaisuuksien mittaustulokset 1(2)

Ensocoat 230 g/m ²	Konerulla	Painojäljen visuaalinen arvio	Parittais- vertailun arvostelu- tulos 1-24	Mottling mediaani	Polttopeittävyys (aallonpituusalue 1,06-8,48 mm) varianssi	Prescale keskiarvo	Prescale Pituuspainotettu flokikoko x-suunnassa mm	Prescale Pituuspainotettu flokikoko y-suunnassa mm	Bristow- absorptio kontaktialka 4 s ml/m ²	Bristow- absorptio kontaktialka 2 s ml/m ²	Bristow- absorptio kontaktialka 1,3 s ml/m ²
Referenssi	6052	2	-*	2,06	4,39	128,355	21,759	21,453	15,3	10,9	8,6
Koepiste 1	6053	2	12	1,78	4,65	121,161	19,088	19,363	15,0	10,9	9,1
Koepiste 2	6054	2	18	1,86	4,71	124,285	20,249	20,471	15,0	10,5	8,7
Koepiste 3	6055	2	0	1,76	5,01	130,522	14,805	14,944	14,8	10,8	8,1
Koepiste 4	6056	2	9	1,75	4,81	131,619	17,236	17,387	14,9	10,5	8,4
Koepiste 5	6057	2	18	1,72	4,44	130,233	15,639	15,857	15,0	9,8	8,7
Koepiste 6	6058	2	6	1,92	4,79	132,588	14,782	14,905	15,5	10,6	8,9
Koepiste 7	6059	2	9	1,84	4,95	133,450	14,176	14,509	15,8	10,0	8,8
Koepiste 8	6060	2	6	1,76	4,47	125,887	19,267	19,287	14,8	10,5	9,2
Koepiste 9	6061	2	21	1,66	4,53	131,244	14,566	14,598	15,5	10,0	8,4
Koepiste 10	6062	2	-*	1,82	4,58	131,723	13,445	13,952	15,1	10,0	7,8

*) parittaisvertailu suoritettu vain faktorikokeen koepisteille

Pintaominaisuuksien mittaustulokset 2(2)

Ensocoat 230 g/m ²	Konerulla	Profiilin aritmeet- tinen poikkeama (cut-off 10 mm) µm	Profiilin aritmeet- tinen poikkeama (cut-off 3 mm) µm	Profiilin aritmeet- tinen poikkeama (cut-off 1 mm) µm	Profiilin aritmeet- tinen poikkeama (cut-off 0,1 mm) µm	Profiilin aritmeet- tinen poikkeama (cut-off 10 mm) µm	Profiilin aritmeet- tinen poikkeama (cut-off 3 mm) µm	Profiilin aritmeet- tinen poikkeama (cut-off 1 mm) µm	Profiilin aritmeet- tinen poikkeama (cut-off 0,1 mm) µm
Referenssi	6052	1,91	1,00	0,69	0,47	3,87	3,35	3,10	2,21
Koepiste 1	6053	1,94	1,02	0,68	0,47	3,79	3,33	3,07	2,17
Koepiste 2	6054	2,07	1,09	0,70	0,48	3,98	3,47	3,23	2,26
Koepiste 3	6055	1,84	0,98	0,69	0,49	3,87	3,43	3,20	2,24
Koepiste 4	6056	2,04	1,03	0,71	0,49	3,79	3,39	3,13	2,18
Koepiste 5	6057	2,04	1,03	0,69	0,49	3,95	3,47	3,23	2,31
Koepiste 6	6058	2,09	1,04	0,69	0,49	3,95	3,44	3,21	2,28
Koepiste 7	6059	1,81	1,01	0,71	0,49	4,08	3,40	3,11	2,26
Koepiste 8	6060	2,03	1,03	0,69	0,49	4,00	3,49	3,21	2,31
Koepiste 9	6061	1,89	1,01	0,70	0,48	3,85	3,44	3,20	2,26
Koepiste 10	6062	1,90	1,05	0,71	0,48	3,97	3,44	3,16	2,25

Ajo-olosuhteet koeajon aikana 7.12.2001 klo 10.30-21.30

Ensocoat 230 g/m²			
Massasuhteet pinta/tausta	Koivu	70	%
	Mänty	30	%
Massasuhteet runko	Koivu	ks. mittaukset	%*
	Mänty	ks. mittaukset	%*
	Hylky	40	%*
Jauhatusaste pinta/tausta	Koivu	22	° SR
	Mänty	27	° SR
Jauhatusaste runko	Koivu	18	° SR
	Mänty	16	° SR
	Hylky	25	° SR
Kerrosnellöpaino	Pinta	ks. mittaukset	g/m ²
	Runko	ks. mittaukset	g/m ²
	Tausta	ks. mittaukset	g/m ²
Retentiotäikkelys	Pinta	1,7	kg/t
	Runko	1,7	kg/t
	Tausta	1,7	kg/t
Retentioaine	Pinta	0,3	kg/t
	Runko	0,3	kg/t
	Tausta	0,3	kg/t
Neutraaliliima	Pinta	0,8	kg/t
	Runko	0,8	kg/t
	Tausta	0,8	kg/t
3-perälaatikon suihkusuhde		1,018	
2-perälaatikon suihkusuhde		1,047	
1-perälaatikon suihkusuhde		1,019	
Viiraosan nopeus		384	m/min
1-puristimen kuormitus		43	kN/m
2-puristimen kuormitus		46	kN/m
3-puristimen kuormitus		43	kN/m
Tasauspuristimen kuormitus		25	kN/m
Pintaliiman väkevyys liima/vesi		10,0	%
1-kalanterin kuormitus		28	kN/m
1-kalanterin lämpötila		80	° C
Soft-kalanterin kuormitus		129	kN/m
Soft-kalanterin lämpötila		134	° C
Rullaimen nopeus		395	m/min

*) runkokerroksen massasuhteet lasketaan prosentteina neitseellisen kuidun määrästä

ENSOCOAT 275 G/M² -KOEAJON MITTAUSTULOKSET JA AJO-OLOSUHTEET (12.12.2001 KLO 06.00-19.15)

Koepisteissä toteutuneet hallintasuureiden arvot

Ensocoat 275 g/m ²	Konerulla	Runkokerroksen koivuosuus %	Runkokerroksen neliömassa g/m ²	Pintakerroksen neliömassa g/m ²	Taustakerroksen neliömassa g/m ²	2-pl sakeus %	3-pl ulosvirtaus l/s	1-pl ulosvirtaus l/s
Referenssi	6152	70	164,5	47,6	47,6	0,418	873	867
Koepiste 1	6153	70	151,6	53,1	53,0	0,380	1011	997
Koepiste 2	6154	70	144,0	57,5	57,6	0,360	1083	1087
Koepiste 3	6155	70	134,5	62,7	63,0	0,344	1152	1179
Koepiste 4	6156	85	134,4	63,4	63,3	0,348	1148	1182
Koepiste 5	6157	85	142,3	58,7	59,2	0,365	1095	1118
Koepiste 6	6159	85	152,6	54,2	54,2	0,389	1005	1047
Koepiste 7	6160	100	152,5	53,3	53,2	0,403	1005	1047
Koepiste 8	6161	100	148,4	57,4	57,3	0,397	1047	1033
Koepiste 9	6162	100	136,7	62,4	62,2	0,366	1103	1132
Koepiste 10	6163	70	156,2	52,9	52,7	0,393	969	1004

Formaation mittaustulokset

Ensocoat 275 g/m ²	Konerulla	Koko kartonki: hajonta g/m ²	norm. hajonta √g/m	Pinta: hajonta g/m ²	norm. hajonta √g/m	Runko: hajonta g/m ²	norm. hajonta √g/m	Tausta: hajonta g/m ²	norm. hajonta √g/m
Referenssi	6152	9,54	0,565	3,40	0,433	8,05	0,596	3,52	0,533
Koepiste 1	6153	8,87	0,532	3,39	0,409	7,13	0,548	3,79	0,538
Koepiste 2	6154	8,99	0,537	3,77	0,439	6,98	0,554	3,97	0,525
Koepiste 3	6155	9,16	0,547	3,80	0,430	6,65	0,543	4,20	0,544
Koepiste 4	6156	8,74	0,522	3,77	0,425	6,21	0,508	4,00	0,512
Koepiste 5	6157	8,45	0,507	3,57	0,415	6,37	0,503	3,85	0,517
Koepiste 6	6159	8,79	0,528	3,68	0,444	6,41	0,499	3,81	0,529
Koepiste 7	6160	8,08	0,486	3,27	0,411	6,15	0,463	3,58	0,521
Koepiste 8	6161	8,53	0,513	3,66	0,438	5,94	0,464	3,92	0,545
Koepiste 9	6162	8,78	0,526	3,73	0,424	5,79	0,471	4,12	0,534
Koepiste 10	6163	9,13	0,547	3,69	0,449	7,40	0,568	3,79	0,533

Mittaustulokset

Ensocoat 275 g/m ²	Kone- rulla	Neliöpaino g/m ²	Tiheys kg/m ³	Kosteus %	Paksuus µm	Jäykkyy- s kone- suunta kN/m	Jäykkyy- s poikki- suunta kN/m	Jäykkyy- suhde KS/PS	Bendtsen- siley- pinta ml/min	Bendtsen- siley- tausta ml/min	PPS 10- siley- pinta µm	PPS 10- siley- tausta µm	Kiilto pinta %	Kiilto tausta %
Referenssi	6152	282,7	834	6,7	340	267	124	2,2	27	217	1,44	5,69	43,5	6,1
Koepiste 1	6153	283,9	835	6,5	340	278	130	2,1	19	204	1,37	5,78	43,5	5,9
Koepiste 2	6154	283,1	835	6,8	339	263	131	2,0	20	208	1,38	5,73	44,3	5,8
Koepiste 3	6155	282,8	839	6,8	338	270	128	2,1	21	213	1,60	5,83	44,1	5,7
Koepiste 4	6156	282,2	840	7,2	336	267	134	2,0	19	198	1,33	5,76	44,7	5,7
Koepiste 5	6157	283,1	842	7,1	337	265	130	2,0	17	214	1,36	5,66	45,3	5,7
Koepiste 6	6159	280,3	830	6,8	338	279	126	2,2	20	225	1,40	5,71	42,1	5,7
Koepiste 7	6160	280,0	826	6,4	339	276	129	2,1	16	201	1,45	5,69	41,3	5,6
Koepiste 8	6161	280,3	830	7,0	337	271	128	2,1	16	199	1,45	5,70	41,3	5,5
Koepiste 9	6162	283,4	845	7,1	335	263	126	2,1	21	219	1,42	5,61	42,2	5,6
Koepiste 10	6163	282,7	838	7,2	338	267	125	2,1	15	189	1,37	5,70	42,4	5,6

Prosessimittaukset 1(2)

Ensocoat 275 g/m ²	Kone- rulla	3-pl huuli- aukko mm	2-pl huuli- aukko mm	1-pl huuli- aukko mm	3-pl huuliero mm	2-pl huuliero mm	1-pl huuliero mm	3-pl sakeus %	2-pl sakeus %	1-pl sakeus %	3-pl ulosvir- taus l/s	2-pl ulosvir- taus l/s	1-pl ulosvir- taus l/s	3-pl paine mm(H ₂ O)	2-pl paine mm(H ₂ O)	1-pl paine mm(H ₂ O)
Referenssi	6152	34,1	46,3	33,4	12,2	9,0	11,1	0,169	0,418	0,170	873	1307	867	1631	1713	1625
Koepiste 1	6153	39,1	48,5	37,9	12,8	11,1	12,0	0,166	0,380	0,170	1011	1364	997	1610	1693	1610
Koepiste 2	6154	41,5	48,5	41,2	13,6	11,1	14,3	0,169	0,360	0,174	1083	1363	1087	1609	1691	1603
Koepiste 3	6155	44,1	48,5	44,4	16,2	11,1	15,6	0,172	0,344	0,172	1152	1363	1179	1602	1690	1597
Koepiste 4	6156	44,0	48,5	44,5	16,3	11,1	15,3	0,172	0,348	0,172	1148	1363	1182	1600	1690	1598
Koepiste 5	6157	42,0	48,5	42,3	15,0	11,1	15,4	0,169	0,365	0,170	1095	1363	1118	1609	1691	1603
Koepiste 6	6159	39,0	48,5	39,8	14,1	11,3	13,3	0,171	0,389	0,166	1005	1364	1047	1608	1690	1607
Koepiste 7	6160	39,0	48,5	39,7	14,1	11,3	13,0	0,166	0,403	0,162	1005	1364	1047	1609	1690	1607
Koepiste 8	6161	40,9	48,5	39,8	13,9	11,3	13,4	0,164	0,397	0,168	1047	1344	1033	1557	1637	1554
Koepiste 9	6162	42,8	48,5	43,4	14,8	11,3	15,8	0,173	0,366	0,172	1103	1344	1132	1554	1636	1550
Koepiste 10	6163	38,1	48,2	38,8	13,3	11,4	13,6	0,168	0,393	0,165	969	1331	1004	1561	1635	1556

Prosessimittaukset 2(2)

Ensocoat 275 g/m ²	Konerulla	Massan paino ennen SymFormeria kg/m ²	Pinnan esipäälylystys (2-asema) g/m ²	Tausta- pigmentointi (3-asema) g/m ²	Pinnan pinta- päälylystys (4-asema) g/m ²
Referenssi	6152	9,0	9,8	3,3	10,3
Koepiste 1	6153	9,0	10,0	4,0	10,1
Koepiste 2	6154	8,5	10,0	3,7	10,4
Koepiste 3	6155	7,8	10,1	3,6	10,2
Koepiste 4	6156	7,7	10,1	3,6	10,2
Koepiste 5	6157	8,4	10,0	3,8	10,1
Koepiste 6	6159	8,6	8,4	3,1	9,3
Koepiste 7	6160	8,8	9,4	3,3	9,1
Koepiste 8	6161	8,5	9,1	3,7	9,4
Koepiste 9	6162	8,0	9,7	3,6	9,0
Koepiste 10	6163	8,7	9,9	3,5	9,1

Pintaominaisuuksien mittaustulokset

Ensocoat 275 g/m ²	Konerulla	Painojäljen visuaalinen arvio	Parittais- vertailun arvostelu- tulos	Mottling	Polttopeittävyys (aallonpituusalue 1,06-8,48 mm)	Prescale keskiarvo	Prescale Pituuspainotettu flokikoko x-suunnassa mm	Prescale Pituuspainotettu flokikoko y-suunnassa mm	Bristow- absorptio kontaktialka 4 s ml/m ²	Bristow- absorptio kontaktialka 2 s ml/m ²	Bristow- absorptio kontaktialka 1,3 s ml/m ²
Referenssi	6152	2	-*	1,72	4,03	112,8	36,2	39,4	15,4	10,5	8,6
Koepiste 1	6153	2	9	1,62	4,08	102,1	35,9	38,6	14,3	10,3	8,6
Koepiste 2	6154	2	12	1,79	4,14	94,7	42,3	44,1	14,6	10,2	8,3
Koepiste 3	6155	2	12	1,63	3,75	105,1	34,7	35,7	14,5	10,5	8,0
Koepiste 4	6156	2	24	1,51	4,50	99,4	37,0	38,8	14,8	10,0	8,3
Koepiste 5	6157	2	21	1,55	3,89	97,6	34,8	36,4	14,1	10,2	8,6
Koepiste 6	6159	2	18	1,74	4,16	116,1	24,8	25,6	14,9	9,7	8,1
Koepiste 7	6160	2	6	1,53	4,00	110,5	26,8	27,8	14,1	9,8	8,2
Koepiste 8	6161	2	0	1,53	3,94	104,4	29,6	31,3	14,8	10,4	8,2
Koepiste 9	6162	2	3	1,54	4,11	106,6	32,4	33,8	14,5	10,8	8,8
Koepiste 10	6163	2	-*	1,61	4,13	99,7	37,5	39,6	14,5	10,1	8,5

*) parittaisvertailu suoritettu vain faktorikokeen koepisteille

Ajo-olosuhteet koeajon aikana 12.12.2001 klo 06.00-19.15

Ensocoat 275 g/m²			
Massasuhteet pinta/tausta	Koivu	70	%
	Mänty	30	%
Massasuhteet runko	Koivu	ks. mittaukset	%*
	Mänty	ks. mittaukset	%*
	Hylky	40	%*
Jauhatusaste pinta/tausta	Koivu	22	° SR
	Mänty	27	° SR
Jauhatusaste runko	Koivu	18	° SR
	Mänty	16	° SR
	Hylky	25	° SR
Kerrosneliöpaino	Pinta	ks. mittaukset	g/m ²
	Runko	ks. mittaukset	g/m ²
	Tausta	ks. mittaukset	g/m ²
Retentiotäikkelys	Pinta	1,7	kg/t
	Runko	1,7	kg/t
	Tausta	1,7	kg/t
Retentioaine	Pinta	0,3	kg/t
	Runko	0,3	kg/t
	Tausta	0,3	kg/t
Neutraaliliima	Pinta	0,9	kg/t
	Runko	1,1	kg/t
	Tausta	0,9	kg/t
3-perälaatikon sulhkusuhde		1,021	
2-perälaatikon sulhkusuhde		1,051	
1-perälaatikon sulhkusuhde		1,020	
Viiraosan nopeus		344	m/min
1-puristimen kuormitus		43	kN/m
2-puristimen kuormitus		46	kN/m
3-puristimen kuormitus		43	kN/m
Tasauspuristimen kuormitus		25	kN/m
Pintaliiman väkevyys liima/vesi		9,0	%
1-kalanterin kuormitus		24	kN/m
1-kalanterin lämpötila		80	° C
Soft-kalanterin kuormitus		76	kN/m
Soft-kalanterin lämpötila		135	° C
Rullaimen nopeus		354	m/min

*) runkokerroksen massasuhteet lasketaan prosentteina neitseellisen kuidun määrästä

PÄÄLLYSTÄMÄTTÖMÄN KOEAJON MITTAUSTULOKSET JA AJO-OLOSUHTEET (14.2.2002 KLO 14.30-16.40)

Koepisteissä toteutuneet hallintasuureiden arvot

Ensocoat 230 g/m ²	Konerulla	3-pl sakeus %	1-pl sakeus %	2-pl sakeus %
Koepiste 1	0840	0,217	0,232	0,372
Koepiste 2	0841	0,184	0,182	0,370
Koepiste 3	0842	0,161	0,163	0,371
Koepiste 4	0843	0,161	0,162	0,355

Formaation mittaustulokset

Ensocoat 230 g/m ²	Konerulla	Koko kartonki: hajonta g/m ²	norm. hajonta √g/m	Pinta: hajonta g/m ²	norm. hajonta √g/m	Runko: hajonta g/m ²	norm. hajonta √g/m	Tausta: hajonta g/m ²	norm. hajonta √g/m
Koepiste 1	0840	7,61	0,500	3,70	0,570	5,57	0,449	3,62	0,562
Koepiste 2	0841	7,50	0,493	3,56	0,551	5,59	0,450	3,51	0,548
Koepiste 3	0842	7,39	0,486	3,40	0,535	5,60	0,452	3,42	0,530
Koepiste 4	0843	7,04	0,445	3,57	0,455	4,91	0,406	3,57	0,524

Mittaustulokset 1(2)

Ensocoat 230 g/m ²	Kone- rulla	Neliöpaino g/m ²	Tiheys kg/m ³	Kosteus %	Paksuus μm	Jäykkyyks kone- suunta kN/m	Jäykkyyks poikki- suunta kN/m	Jäykkyyks- suhde KS/PS	Bendtsen- sileys pinta ml/min	Bendtsen- sileys tausta ml/min	PPS 10- sileys pinta μm	PPS 10- sileys tausta μm	Kokoonpuristuvuus PPS10/PPS 20
Koepiste 1	0840	229,3	750	6,8	306	192	90	2,1	385	434	5,51	5,35	1,20
Koepiste 2	0841	228,0	751	7,4	305	181	87	2,1	387	417	5,37	5,28	1,19
Koepiste 3	0842	228,7	752	7,2	304	183	88	2,1	355	377	5,43	5,28	1,19
Koepiste 4	0843	249,3	854	7,2	292	175	98	1,8	14	191	1,06	5,94	1,54

Mittaustulokset 2(2)

Ensocoat 230 g/m ²	Kone- rulla	Puh- kaisulujuus	Vetolujuus KS	Vetolujuus PS	Geometrinen vetolujuus √(KS/PS)	Venymä KS	Venymä PS	Kimmokerroin KS	Kimmokerroin PS	Huokoisuus (Gurley-Hill) pinta s	Cobb 2 min pinta g/m ²	Cobb 2 min tausta g/m ²	K&N värin- absorptiokyky pinta %
Koepiste 1	0840	875	19,79	9,32	13,6	2,3	5,6	6582	2755	22,2	38	40	40,9
Koepiste 2	0841	867	19,45	9,88	13,9	2,4	5,4	6446	2945	22,4	35	36	40,7
Koepiste 3	0842	863	19,29	10,45	14,2	2,3	5,8	6406	2895	22,0	35	35	42,8
Koepiste 4	0843	1232	*	*	*	*	*	*	*	9139	47	47	8,0

*) ei mitattu

Prosessimittaukset

Ensocoat 230 g/m ²	Kone- rulla	3-pl huuli- aukko	2-pl huuli- aukko	1-pl huuli- aukko	3-pl huu- liero	2-pl huu- liero	1-pl huu- liero	3-pl ulos- virta- us	2-pl ulos- virta- us	1-pl ulos- virta- us	3-pl paine mm(H ₂ O)	2-pl paine mm(H ₂ O)	1-pl paine mm(H ₂ O)	Massan paino ennen SymFormeria	Pinnan esipäälyl- tyys (2-asema) g/m ²	Tausta- pigmen- tointi (3-asema) g/m ²	Pinnan pintapää- lystys (4-asema) g/m ²
Koepiste 1	0840	28,0	48,8	26,1	10,0	11,1	9,4	705	1340	695	1628	1692	1625	9,2	0	0	0
Koepiste 2	0841	32,0	48,8	31,9	11,0	11,1	10,6	818	1341	860	1620	1691	1622	9,2	0	0	0
Koepiste 3	0842	36,0	48,8	35,8	13,0	11,0	11,6	924	1340	970	1612	1690	1611	9,1	0	0	0
Koepiste 4	0843	35,9	48,8	36,0	12,9	11,1	11,1	923	1340	979	1614	1691	1611	8,7	8,3	4,2	7,4

Pintaominaisuuksien mittaustulokset

Ensocoat 230 g/m ²	Konerulla	Profiilin aritmeettii- nen poikkeama (cut-off 10 mm) µm	Profiilin aritmeettii- nen poikkeama (cut-off 3 mm) µm	Profiilin aritmeettii- nen poikkeama (cut-off 1 mm) µm	Profiilin aritmeettii- nen poikkeama (cut-off 0,1 mm) µm	Bristow-absorptio kontaktialka 4 s ml/m ²	Bristow-absorptio kontaktialka 2 s ml/m ²	Bristow-absorptio kontaktialka 1,3 s ml/m ²
Koepiste 1	0840	4,75	4,01	3,61	2,54	24,7	17,9	15,2
Koepiste 2	0841	4,60	4,05	3,65	2,51	24,9	18,0	16,0
Koepiste 3	0842	4,46	3,98	3,60	2,48	24,7	18,0	15,3
Koepiste 4	0843	1,64	0,94	0,70	0,53	14,0	10,1	8,1

Ajo-olosuhteet koeajon aikana 14.2.2002 klo 14.30-16.40

Ensocoat 230 g/m²			
Massasuhteet pinta/tausta	Koivu	75	%
	Mänty	25	%
Massasuhteet runko	Koivu	100	%*
	Hylky	45	%*
Jauhatusaste pinta/tausta	Koivu	20	° SR
	Mänty	32	° SR
Jauhatusaste runko	Koivu	17	° SR
	Hylky	24	° SR
Kerrosneliöpaino	Pinta	52	g/m ²
	Runko	135	g/m ²
	Tausta	52	g/m ²
Retentiotäkkelys	Pinta	1,7	kg/t
	Runko	1,7	kg/t
	Tausta	1,7	kg/t
Retentioaine	Pinta	0,3	kg/t
	Runko	0,3	kg/t
	Tausta	0,3	kg/t
Neutraaliliima	Pinta	0,8	kg/t
	Runko	0,8	kg/t
	Tausta	0,8	kg/t
3-perälaatikon suihkusuhde		1,021	
2-perälaatikon suihkusuhde		1,051	
1-perälaatikon suihkusuhde		1,020	
Viiraosan nopeus		344	m/min
1-puristimen kuormitus		54	kN/m
2-puristimen kuormitus		53	kN/m
3-puristimen kuormitus		44	kN/m
Tasauspuristimen kuormitus		28	kN/m
Pintaliiman väkevyys liima/vesi		0	%
1-kalanterin kuormitus		21	kN/m
1-kalanterin lämpötila		62	° C
Soft-kalanterin kuormitus		0	kN/m
Soft-kalanterin lämpötila		126	° C
Rullalimen nopeus		354	m/min

*) runkokerroksen massasuhteet lasketaan prosentteina neitseellisen kuidun määrästä

KILPAILIJAVERTAILUN MITTAUSTULOKSET

Näyte	Kartonki-laji SBS/FBB	Bendtsen-sileys pinta ml/min	Bendtsen-sileys tausta ml/min	PPS 10 -sileys pinta µm	PPS 10 -sileys tausta µm	Cobb 2 min pinta g/m²	Cobb 2 min tausta g/m²	Formaatio hajonta g/m²	norm. hajonta √g/m	Visuaali-nen arvio pinta 1-5	Visuaali-nen arvio tausta 1-5
A	SBS	40	175	1,70	5,73	41,6	36,7	6,7	0,42	2,0	4,0
B	SBS	12	80	0,77	3,43	32,4	29,8	7,9	0,49	1,0	2,0
C	SBS	12	320	1,35	7,74	30,7	32,2	7,5	0,48	1,0	4,0
D	SBS	44	315	1,69	6,88	45,9	41,6	12,9	0,83	3,0	5,0
E	SBS	22	310	1,51	8,28	37,2	28,7	6,5	0,41	3,0	4,0
F	FBB	70	750	1,58	8,21	33,6	32,2	10,5	0,65	3,0	3,5
G	FBB	30	300	1,66	6,22	31,8	32,9	12,2	0,78	3,5	3,5
H	FBB	50	505	1,26	7,24	38,9	34,2	9,2	0,66	3,0	4,0
I	FBB	10	190	1,33	4,49	61,3	150,5	6,4	0,42	3,5	4,0
J	FBB	30	175	1,31	3,93	51,2	114,7	6,6	0,43	3,5	3,5
K	FBB	46	310	1,28	5,46	35,6	33,6	9,7	0,63	3,0	3,5
L	FBB	40	110	1,21	2,93	50,7	72,7	7,7	0,49	3,0	2,5
M	FBB	65	165	1,65	3,47	37,3	122,1	6,4	0,41	4,0	5,0
N	FBB	10	390	1,08	7,17	30,1	37,5	6,5	0,42	3,0	3,5
O	FBB	24	405	1,52	7,87	35,7	34,8	8,7	0,57	3,5	3,5
P	FBB	4	205	0,81	5,27	40,0	65,3	6,5	0,41	3,0	3,0
Q	FBB	16	210	1,11	4,58	44,3	34,3	9,3	0,62	2,5	3,0
R	FBB	36	280	1,95	6,07	22,5	29,4	8,0	0,52	3,0	2,5
S	FBB	14	285	1,40	7,06	37,9	99,6	9,0	0,58	1,5	3,0

Näyte	Kartonki- laji	Kiilto pinta	Kiilto tausta	K&N värin- absorp- tiokyky pinta %	K&N värin- absorp- tiokyky tausta %	K&N huo- koisuus pinta %	K&N huo- koisuus tausta %	Formaatio, hajonta	norm. hajonta	Visuaali- nen arvio pinta	Visuaali- nen arvio tausta
	SBS/FBB	%	%					g/m ²	√g/m	1-5	1-5
A	SBS	40,8	6,5	9,7	35,9	27,3	70,6	6,7	0,42	2,0	4,0
B	SBS	73,3	7,6	3,6	18,0	15,7	50,6	7,9	0,49	1,0	2,0
C	SBS	36,9	6,6	6,1	42,9	21,3	76,4	7,5	0,48	1,0	4,0
D	SBS	44,2	8,9	13,2	54,9	32,0	80,1	12,9	0,83	3,0	5,0
E	SBS	76,3	5,8	10,2	55,2	21,3	86,4	6,5	0,41	3,0	4,0
F	FBB	40,9	10,3	5,9	14,7	20,1	36,3	10,5	0,65	3,0	3,5
G	FBB	45,5	13,2	4,5	14,0	15,7	34,2	12,2	0,78	3,5	3,5
H	FBB	52,4	11,5	4,3	13,4	13,6	36,4	9,2	0,66	3,0	4,0
I	FBB	32,8	11,4	15,0	20,4	17,3	32,7	6,4	0,42	3,5	4,0
J	FBB	55,3	24,0	10,3	14,7	18,3	28,5	6,6	0,43	3,5	3,5
K	FBB	51,2	6,2	9,3	15,4	20,0	50,2	9,7	0,63	3,0	3,5
L	FBB	61,0	29,7	11,0	13,7	17,4	29,0	7,7	0,49	3,0	2,5
M	FBB	59,9	30,3	11,3	13,1	19,4	24,0	6,4	0,41	4,0	5,0
N	FBB	45,1	14,6	16,1	20,2	36,9	53,8	6,5	0,42	3,0	3,5
O	FBB	62,1	8,1	8,9	23,7	25,4	58,7	8,7	0,57	3,5	3,5
P	FBB	64,9	27,6	14,1	18,5	27,3	36,6	6,5	0,41	3,0	3,0
Q	FBB	54,8	25,4	16,9	17,4	38,0	41,9	9,3	0,62	2,5	3,0
R	FBB	43,3	9,1	7,9	19,2	28,0	45,7	8,0	0,52	3,0	2,5
S	FBB	50,5	5,0	1,3	17,0	35,8	49,9	9,0	0,58	1,5	3,0

Puu - 21

Aalto-yliopisto
Kemian tekniikan korkeakoulu
Puunjalostustekniikan kirjasto